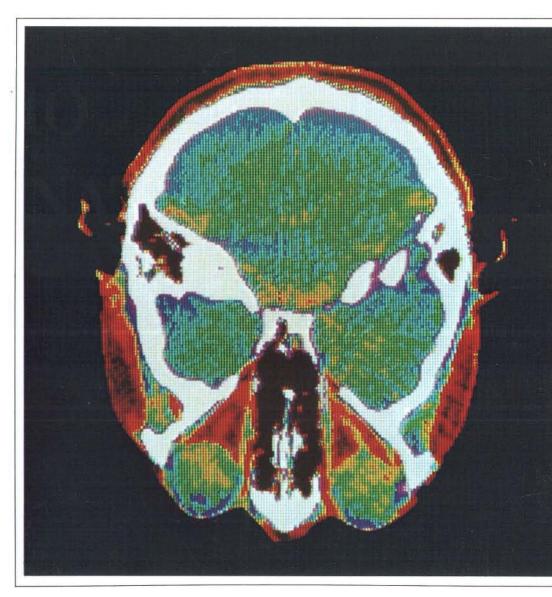
10 53° jaargang

NATUUR'85 &TECHNIEK

natuurwetenschappelijk en technisch maandblad



Actuele informatie over

Biotechnologie DNA-recombinatie Maatschappelijke gevolgen van micro-elektronika Zeeonderzoek

Bij de Dienst Wetenschapsvoorlichting, N.Z. Voorburgwal 120, 1012 SH Amsterdam tel. (020) 23 23 04 (vragen naar Marten Knip).

Vermeldt bij uw vraag s.v.p. deze advertentie. Dienst Wetenschapsvoorlichting

NATUUR '85 &TECHNIEK

Losse nummers: f 8,45 of 160 F.

natuurwetenschappelijk en technisch maandblad



Bij de omslag

De hersenen spelen een belangrijke rol bij de verwerking van optische prikkels tot het beeld dat wij gewaar worden. Met behulp van een computertomograaf kan men van buitenaf een beeld vormen van de structuur van de hersenen. Men ziet hier een horizontale 'doorsnede' ter hoogte van de ogen (onder). De oogzenuwen lopen achter de ogen naar elkaar toe. Niet te zien is dat zij elkaar kruisen onder de hersenmassa, om er daarna in te verdwijnen. Zie ook: pag. 764 e.v.

Foto: Ohio Nuclear Corp., Science Photo Library, London

Hoofdredacteur: Th.J.M. Martens.

Adj. hoofdredacteur: Dr. G.M.N. Verschuuren.

Redactie: Drs. H.E.A. Dassen, Drs. T.J. Kortbeek, J.A.B. Verduijn.

Redactiesecretaresse: T. Habets-Olde Juninck.

Redactiemedewerkers: A. de Kool, Drs. Chr. Titulaer, Dr. J. Willems. Wetenschappelijke correspondenten: Ir. J.D. van der Baan, Dr. P. Bentvelzen, Dr. W. Bijleveld, Dr. E. Dekker, Drs. C. Floor, Dr. L.A.M. v.d. Heijden, Ir. F. Van Hulle, Dr. F.P. Israel, Prof. dr. H. Janssens, Drs. J.A. Jasperse, Dr. D. De Keukeleire, Dr. F.W. van Leeuwen, Ir. Luyendijk, Dr. C.M.E. Otten, Ir. A.K.S. Polderman, Dr. J.F.M. Post, R.J. Querido, Dr. A.F.J. v. Raan, Dr. A.R. Ritsema, Ir. G.J. Schiereck, Dr. M. Sluyser, Prof.dr. J.T.F. Zimmerman.

Redactie Adviesraad: Prof. dr. W. J. van Doorenmaalen, Prof. dr. W. Fiers, Prof. dr. J. H. Oort, Prof. dr. ir. A. Rörsch, Prof. dr. R. T. Van de Walle, Prof. dr. F. Van Noten.

De Redactie Adviesraad heeft de taak de redactie van Natuur en Techniek in algemene zin te adviseren en draagt geen verantwoordelijkheid voor afzonderlijke artikelen.

Grafische vormgeving: H. Beurskens, W. Keulers-v.d. Heuvel, M. Verreijt.

Druk.: VÁLKENBURG offset, Echt (L.). Telefoon 04754-1223*. Redactie en Administratie zijn te bereiken op:

Voor Nederland: Postbus 415, 6200 AK Maastricht. Tel.: 043-254044*. Voor België: Tervurenlaan 32, 1040-Brussel. Tel.: 00-3143254044



Artikelen met nevenstaand vignet resulteren uit het EURO-artikelen project, waarin NATUUR EN TECHNIEK samenwerkt met ENDEA-VOUR (GB), LA RECHERCHE (F), DIE UMSCHAU (D), SCIENZA E TECHNICA (I), TECHNOLOGY IRELAND (EI) en PERISCOPIO TIS EPISTIMIS (GR), met de steun van het Directoraat-generaal Informatiemarkt en Innovatie van de Commissie van de Europese Gemeenschappen.



Gehele of gedeeltelijke overname van artikelen en illustraties in deze uitgave (ook voor publikaties in het buitenland) mag uitsluitend geschieden met schriftelijke toestemming van de uitgever en de auteur(s).

Een uitgave van

ISSN 0028-1093

Centrale uitgeverij en adviesbureau b.v.

INHOUD

BEZIENSWAARDIG	VI
AUTEURS	VII
COLUMN Tweede fase	VII
HOOFDARTIKEL Raketten	IX



728

742

748

NIELS BOHR (1885-1962)

Fysicus/filosoof

Hans Radder

Beroemde kunstenaars, politici en ook wetenschappers, worden minstens twee keer per eeuw herdacht: ter gelegenheid van hun geboorte- en van hun sterfjaar. Vandaar dit artikel over de Deense theoretisch natuurkundige Niels Hendrik Bohr, die op 7 oktober 1885 geboren werd in Kopenhagen en op 18 november 1962 in diezelfde stad overleed. Tijdens zijn leven verrichtte hij baanbrekend werk in de atoomfysica.

NIELS BOHR

Herinneringen aan een leermeester

H.B.G. Casimir

In dit artikel haalt de auteur een aantal herinneringen op over Niels Bohr. Bohr komt hierin naar voren als een eminent onderzoeker, die door zijn onorthodoxe houding en visie op zowel wetenschappelijke als meer dagelijkse zaken vele vrienden om zich heen verzamelde. Vooral zijn visie op de bouw van atomen heeft een revolutie in deze tak van de fysica veroorzaakt. Toch kon hij niet iedereen van zijn gelijk overtuigen: zo bleef Einstein tot het einde toe sceptisch over Bohr's ideeën.

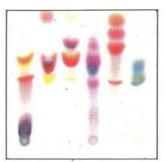
Vare of fylde for 1 - a Norst + 1 - + J (\frac{1}{12}, + \frac{1}{12}) (3) g 0 - J \frac{i(u-1 + \frac{1}{12})}{a^2 \cdot \frac{1}{2}} - \frac{1}{2} + 2\frac{1}{2} \frac{1}{2} b) \(\frac{1}{2} \) (i(da) + i \(\frac{1}{2} \) \(\frac{1}{2} \) \(\frac{1}{2} \) (i(da) + \(\frac{1}{2} \) \(\frac{1}{2} \) (i(da) + \frac{1}{2} \) \(\frac{1}{2} \) (i(da) + \(\frac{1}{2} \) \(\frac{1}{2} \) (i(da) + \frac{1}{2} \) \(\frac{1}{2} \) (i(da) + \frac{1}{2} \) \(\frac{1}{2} \) (i(da) + \frac{1}{2} \) \(\frac{1} \) \(\frac{1}{2} \) \(\frac{1}{2} \) \(\frac{1}{2} \) \(\frac{1}{

CHROMATOGRAFIE

De kunst van het scheiden

U.A.Th. Brinkman

De chromatografie omvat een aantal analysetechnieken, die alle gemeen hebben dat ze de te analyseren monsters in hun afzonderlijke componenten scheiden en zo basis geven aan het woord 'scheikunde'. ledere stof heeft een bepaalde, eigen affiniteit tot een gas, een vloeistof, of een vaste stof. Zodoende kan men stoffen van elkaar scheiden wanneer men twee fasen langs elkaar laat stromen; de ene stof zal zich namelijk gemakkelijker door een (stromende) fase laten meevoeren dan de andere.



NATUUR '85 &TECHNIEK

oktober/53° jaargang/1985



BEELD EN VERBEELDING

M.C. Colenbrander

Zien is voor ieder die zien kan een vanzelfsprekendheid. Het proces, dat begint als licht op het oog valt, eindigt in de hersenen, waar de impulsen uit de oogzenuwen verwerkt worden tot een beeld zoals wij dat ervaren. Daarbij treden nog veel merkwaardige verschijnselen aan het licht. Zo bestaan er mechanismen die prikkels als het ware selecteren, voordat ze tot ons bewustzijn worden toegelaten.



ECOLOGISCHE MODELBOUW

Rekenen aan een ecosysteem

I. de Vries en J.P.G. van de Kamer

De afsluiting van de Grevelingen in 1971 heeft tot een groot aantal veranderingen in de ecologie van dit gebied geleid. Deze kan men vaststellen door metingen te verrichten aan flora en fauna, de opgeloste voedingsstoffen e.d. Zulke meetreeksen geven een beeld van de veranderende werkelijkheid. Voor een (integrale) verklaring van het gebeuren en de mogelijkheid de effecten van een nieuwe ingreep te voorspellen, is het mogelijk een wiskundig model te maken.



MILITAIRE RAKETTEN

Techniek voor dodelijke precisie

Alberto Mondini

Raketten zijn niet meer weg te denken uit de hedendaagse arsenalen. Zij kunnen voor een groot aantal toepassingen ingeschakeld worden. In hun primitiefste vorm waren het niet meer dan veredelde kogels, die op een zichtbaar doel afgevuurd werden. Wat verder ontwikkelde vormen konden van grotere afstand gericht en met behulp van radar naar het doel geleid worden. Tegenwoordig is zelfs dat niet meer nodig. Op basis van een globale richtingaanduiding sporen de raketten zelf hun doel op en gaan erop af. De omstreden kruisraket vindt zijn doel door een elektronische vorm van kaartlezen. Satellieten leveren daarvoor de kaarten.

Nederland in Spacelab D-1 / Graffiti / Schimmels tegen dioxine / Aardmetingen / Genetisch goudmijntje

TEKST VAN TOEN Hoe staat het met de Televisie? 806

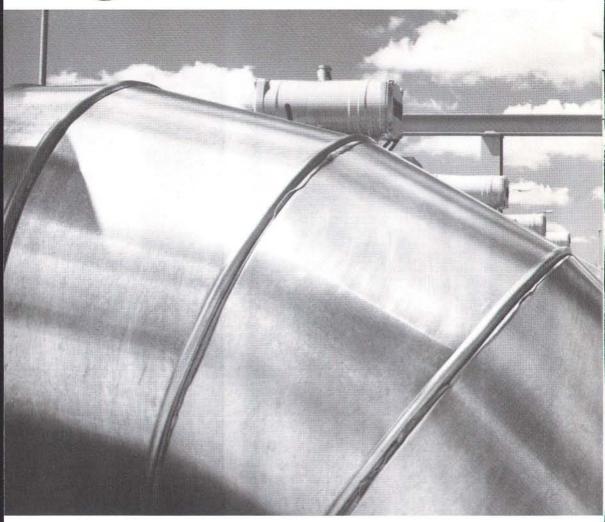
764

776

792

811

De grootste mixer van Europa



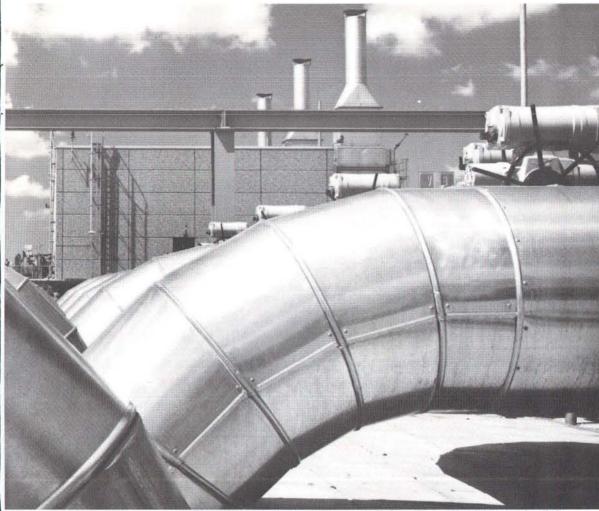
Aardgas moet constant van dezelfde kwaliteit zijn. De apparatuur in uw huis en in de industrie is daar op afgesteld. Daar valt niet mee te marchanderen. Alleen, de natuur houdt er geen rekening mee. En levert aardgas van verschillende samenstelling en kwaliteit, ofwel calorische waarde.

Uw apparatuur vraagt om aardgas van de kwaliteit zoals die in Groningen wordt gewonnen. Daar zorgen we voor, dat is de afspraak. Maar tegenwoordig komt ons aardgas niet uitsluitend uit Groningen, maar bijvoorbeeld ook uit aardgasvelden onder de Noordzee. Of uit Friesland, Drente, Noord-Holland, Zuid-Holland of Twente.

Gas van andere, veelal hogere calorische waarde. Onbruikbaar dus?

Ons aardgas is in goede

staat in de Wieringermeer.



In 10 mengstraten wordt hoog- en laagcalorisch gas gemengd tot de gewenste kwaliteit.

Niet wanneer we de verschillende soorten aardgas zo mengen dat we precies weer op de Groningse kwaliteit uitkomen.

Dat gebeurt onder meer in de Wieringermeer. Daar is vorig jaar een enorm mengstation in werking gesteld. Zeg maar gerust de grootste mixer van Europa. Dankzij de kunst van het mengen is de energievoorziening niet uitsluitend aangewezen op het grote gasveld van Groningen. Er zijn veel meer mogelijkheden. Nu en in de toekomst.

Als u daar meer over wilt weten, schrijf dan even naar N.V. Nederlandse Gasunie, postbus 19, 9700 MA Groningen en vraag de brochure 'Nederland en z'n aardgas' aan.



handen bij de Gasunie.

Techniek voor meisjes

Op 16 november a.s. vindt in Utrecht een landelijke bijeenkomst plaats voor vrouwen die een technisch vak hebben of een technische opleiding hebben gevolgd of volgen. De dag is bedoeld voor vrouwen die mee willen werken of denken aan een heel nieuw project: Technika 10. Technika 10 staat voor technische hobbyclubs voor meisjes vanaf ongeveer 10 jaar onder leiding van vrouwen. Hierdoor komen meisjes op een speelse manier op jonge leeftijd in aanraking met techniek.

Meisjes worden namelijk niet echt aangemoedigd om zich met techniek of exacte dingen bezig te houden. Ze worden niet meegenomen met hun vader naar de garage. Ze maken hun handen niet vies aan een brommer of een fiets. Ze worden niet 'beloond' als ze goed zijn in die richting. Er zijn vaak geen vrouwen in de buurt die een technische opleiding hebben gevolgd waarmee ze zich kunnen identificeren. De laatste tijd zien ze, als het meezit, wel vrouwen die ook zelf iets in huis kunnen repareren, maar dat is dan ook meestal alles. Er zijn maar heel weinig vrouwen met hobby's op dit terrein.

We zetten aparte hobbyclubs voor meisjes op, omdat gebleken is dat in gemengde activiteiten meisjes veel minder aan bod komen dan jongens.

Voor verdere informatie kunt u contact opnemen met de Nederlandse Federatie Jeugd- en Jongerenwerk (NFJJ), Liebje Hoekendijk, Henri Polaklaan 14, 1018 CS Amsterdam. © 020-241345.

Digistar

Europa's eerste ruimte-theater, het Omniversum in Den Haag, heeft er een bijzondere attractie bij: de Digistar.

Deze digitale planetarium-projector projecteert de sterrenhemel in drie dimensies op de reusachtige koepelwand van Omniversum. De bezoeker waant zich daardoor op een spectaculaire reis door het heelal. Ieder willekeurig punt aan de sterrenhemel kan het reisdoel worden.

Omniversum beschikt als derde in de wereld, over deze bijzondere computergestuurde projector. De andere projectoren staan in de Verenigde Staten.

Het hart van de Digistar wordt gevormd door een snelle computer, die de opeenvolgende beelden berekent en daarna projecteert door een lichtsterke beeldbuis met een visseooglens. Hij toont ons niet alleen de hemel die wij gewoon zijn vanaf de aarde te zien, maar bijvoorbeeld ook de sterrenhemel gezien vanaf een planeet die rond de Poolster draait. Met de lichtsnelheid zou een reis naar de Orion-nevel 1500 jaren duren, met de Digistar duurt de reis slechts 15 seconden. Ook kan onze eigen sterrenhemel in iedere richting en om iedere as gedraaid worden. De bezoeker waant zich op Venus, waar de sterrenhemel de andere kant opdraait, of op Uranus, waar de hemel draait om een as loodrecht op de aardas. Daar leggen de sterren heel andere banen aan de hemel af en duurt een dag maar liefst 84 jaar.

Tijdens werkdagen tussen 09.00 en 12.00 uur bestaat er de mogelijkheid kaarten te reserveren: © 070-545454. Voor schoolgroepen bestaat er een speciaal groepstarief.

Vissen

Voor mensen met enige biologische kennis is het de moeite waard eens naar een van de Biologische Raad-symposia te gaan, die jaarlijks gehouden worden. Dit jaar staan vissen centraal. Voor de pauze worden diverse biologische aspecten van het leven van vissen behandeld: het leven met kieuwen, zwemmen, de groei en hoe vissen onder water waarnemen. In het middagprogramma wordt uitgelegd wat de betekenis van deze gegevens is voor het waterbeheer, de visserij en de visteelt.

Het symposium wordt gehouden op 1 november a.s. in het Tropenmuseum in Amsterdam. Men kan zich opgeven door f 9,50 over te maken op giro 79250 ten name van de Biologische Raad, Amsterdam onder vermelding van 'symposium vissen'. Wilt u de lunch gebruiken, dan moet u f 23, – overmaken.

Voor inlichtingen: ☎ 020-222902.

Halley

Wie meer wil weten over de komeet van Halley kan op zaterdag 26 oktober terecht op een studiedag in Brussel, georganiseerd door de JVS-Brussel en de Brabantse afdeling van de Vereniging voor Sterrenkunde. Deskundigen zullen daar inleidingen verzorgen over de komeet en de diverse onderzoeksprojecten die bij de nadering daarvan in gang zijn gezet. Aan de orde komen o.a. de geschiedenis van de komeet en het waarnemingswerk dat door amateurs gedaan wordt. Veel aandacht is er uiteraard voor het Europese Giotto-project.

De dag begint om 10 uur in lokaal 9c van de Vrije Universiteit, Pleinlaan 2 (metrostation Petillon, NMBS-station Etterbeek). Voor inlichtingen: © 02-7318579.

DE AUTEURS

Dr. Hans Radder ('Niels Bohr') is op 5 april 1949 in Numansdorp geboren. Hij studeerde natuurkunde aan de Vrije Universiteit en filosofie aan de Universiteit van Amsterdam. Sinds 1978 is hij medewerker bij de vakgroep filosofie van de natuurwetenschappen van de Centrale Interfaculteit van de Vrije Universiteit van Amsterdam. Hij promoveerde in 1984.

Prof. dr. H.B.G. Casimir ('Niels Bohr') is in 1909 te 's-Gravenhage geboren. Van 1926 tot 1930 studeerde hij wis- en natuurkunde aan de Rijksuniversiteit te Leiden, waar hij in 1931 promoveerde. Na een jaar in Zürich gewerkt te hebben, keerde hij terug naar Leiden waar hij in 1939 bijzonder hoogleraar in de natuurkunde werd. In 1942 trad hij in dienst van Philips waar hij directeur van het Natuurkundig Laboratorium en lid van de Raad van Bestuur was. Van 1973 tot 1978 was hij President van de Koninklijke Nederlandse Akademie van Wetenschappen.

Prof. dr. U.A.Th. Brinkman ('Chromatografie') is op 2 december 1935 in Amsterdam geboren. Van 1953 tot 1961 studeerde hij scheikunde aan de Vrije Universiteit van zijn geboorteplaats. Daarna trad hij in dienst van de vakgroep analytische chemie van de VU. Hij promoveerde in 1968. Behalve hoogleraar is hij voorzitter van de Raad van Bestuur van het Instituut voor Milieuvraagstukken van de VU.

Prof. dr. M.C. Colenbrander ('Beeld en verbeelding') werd geboren op 19 februari 1904 te Heemstede. Hij studeerde geneeskunde van 1922 tot 1929 te Utrecht en promoveerde in 1932 te Leiden. Van 1932 tot 1949 was hij oogarts in Delft en tot 1971 hoogleraar in de oogheelkunde te Leiden.

Drs. I. de Vries ('Modelbouw') is op 11 augustus 1950 in Medan (Indonesië) geboren. Hij studeerde biologie aan de Vrije Universiteit van Amsterdam. Na zijn afstuderen in 1978, trad hij in dienst van de afdeling Milieubiologie van de R.U. Leiden. Sinds 1980 is hij als projectingenieur verbonden aan het Waterloopkundig Laboratorium in Delft.

Ir. J.P.G. van de Kamer ('Modelbouw') is op 14 april 1954 in Bergen (NH) geboren. Hij studeerde van 1972 tot 1979 toegepaste wiskunde aan de Technische Hogeschool Twente. Sinds 1979 is hij als wetenschappelijk medewerker werkzaam bij de Deltadienst van Rijkswaterstaat in Middelburg.

Ir. Alberto Mondini ('Militaire raketten') is in 1915 in Rome geboren. Hij studeerde elektrotechniek en was als docent geschiedenis van de techniek verbonden aan de universiteiten van Genua en Rome. Hij schreef meerdere boeken, waaronder een vierdelige 'Geschiedenis van de techniek'. Daarnaast is hij verbonden aan de 'Enciclopedia Italiana'.

Tweede fase

Nog een goed halfjaar en vele duizenden volgens schema klaargestoomde doctorandussen staan voor de vraag of ze zich op het schoolverlatersdeel van de arbeidsmarkt zullen storten, danwel de kans zullen krijgen zich nog enige tijd aan de misschien ook niet meer zo warme, maar toch in elk geval redelijk vertrouwde borst van Alma Mater te blijven koesteren. De eerste golf in de tweefasenstructuur opgeleide studenten heeft de eerste fase er bijna opzitten.

Beter laat dan nooit heeft men ontdekt, dat op zijn minst in de naam van het beestje opgesloten zit, dat er ook een tweede fase zou moeten zijn. Er zijn wat pogingen gedaan om die tot stand te brengen door de ogen dicht te doen en te zeggen: "Er zij een tweede fase", maar toen men weer keek, bleek er geen wonder te zijn gebeurd.

Inmiddels is men dan maar begonnen met werken. Niet dat er niets anders te doen was, maar het moest nu eenmaal. Er is nu een zeer aanzienlijke berg papier verbruikt, en, als ik het goed begrijp, is er inmiddels ook een paar mensen dat door heeft wat de bedoeling is. Wat natuurlijk nog geenszins betekent, dat er al iets als een organisatie bestaat waarin die tweede fase ook vorm heeft gekregen.

Waarschijnlijk in het kader van het algemene streven naar deregulering is er zorgvuldig
voor gewaakt de zaken al te eenvoudig en
overzichtelijk te maken. Met de wantoestand
dat iemand gewoon gaat studeren en dat degenen die blijk geven goed onderzoek te kunnen
doen samen met hun hoogleraar een promotieplan maken, diende definitief te worden afgerekend.

Dat gaat er nu ongeveer als volgt uitzien. Iedereen volgt in vier jaar een programma en is na die vier jaar doctorandus. Voor sommige mensen is dat niet genoeg. Na de vier jaar kan dan ook nog de artsenopleiding, de lerarenopleiding en de opleiding tot filosoof voor een bepaald vakgebied (!?) komen. Hoe dat precies zal gaan is nog niet duidelijk, maar ach, we hebben nog een heel halfjaar, nietwaar?

Anderen vonden het misschien zelf welletjes, maar het zou kunnen gebeuren dat weer anderen (de werkgever bijv.) het daarmee niet eens zijn. Die mogen op de een of andere manier ook in september terugkomen, maar dan wel op eigen kosten. Het zal de minister een zorg zijn of de student zelf of zijn werkgever betaalt, als het de minister maar niets kost. Hoewel zelfs dat de laatste tijd weer wat minder zeker is geworden, want de minister wil wel weer wat betalen voor het scheppen van opleidingsmogelijkheden voor deze mensen. In elk geval is nog in het geheel niet duidelijk hoeveel er waarvoor in rekening zou moeten worden gebracht.

Dat probleem is opgelost door in dit geval niet te spreken van een tweede fase, maar van een postdoctorale opleiding. Om de zaken wat overzichtelijker te maken is in de tamelijk recente nota 'Hoger Onderwijs: Autonomie en Kwaliteit' toch weer wel sprake van tweede fase-onderwijs in dit verband.

En dan de rest. Voor 5100 afgestudeerden zal de mogelijkheid bestaan nog door te gaan. Elk jaar kunnen er duizend mensen aan een promotie-onderzoek beginnen, dat ze dan in vier jaar moeten afronden. Verder zal er elk jaar voor 500 studenten de mogelijkheid zijn een speciale ontwerpersopleiding te volgen, die twee jaar zal duren. Soms wordt heel stellig beweerd dat een deel van dit volk een tweejarige onderzoeksopleiding zal gaan krijgen, met als resultaat een zgn. researchaantekening op hun doctorandussenbul, maar soms wordt ook weer gezegd dat men daar nog eens over moet denken.

Om te beginnen lijkt dat totaal van 5100 wat erg aan de hoge kant bij de gegeven instroomcijfers. Laten we eens kijken hoe de toestand is op, zeg 31 december 1992, als het stelsel op volle toeren met draaien. Gaan we ervan uit, dat er altijd een perfecte aansluiting is (maar niets is volmaakt in deze wereld) tussen promotiedatum en de indiensttreding van de volgende klant en dat iedereen die aan de klus begint er ook mee doorgaat (ook al niet erg waarschijnlijk), dan zijn er 1000 assistenten-inopleiding (a.i.o.'s) die in 1989 met hun promotie-onderzoek zijn begonnen, 1000 uit 1990, 1000 uit 1991 en 1000 uit 1992 is totaal 4000. Verder zijn er 500 ontwerpstudenten van de jaargang 1991 en 500 van 1992, dat is nog eens duizend samen. Let wel: dit alles zegt bar weinig over het totaal aantal promovendi, want alles wat ZWO nu op dat gebied doet valt buiten het verhaal.

Tweede-fasestudenten zijn geen studenten maar a.i.o.'s. Wat daarover gezegd is door het departement heeft uitsluitend betrekking op promovendi: die moeten ten minste dertig procent van hun tijd onderzoek doen en mogen niet meer dan 25 procent van hun tijd onderwijs geven. Hoe dat zou moeten met de aspirant-ontwerpers moeten we vooralsnog raden. De drie TH's en de universiteit van Groningen hebben daar wel ideeën over: er zouden twaalf multidisciplinaire specialismen (echt waar!) moeten komen.

De minister schijnt dat voorlopig best te vinden (ten departemente was niet op korte termijn commentaar te krijgen), mits die ontwerpers ook maar gewone a.i.o.'s zijn, dat wil zeggen betaald worden, al is het een schijntje. Het geld daarvoor moet komen uit het verdwijnen van personeelsplaatsen (de minister denkt aan bestaande doorstroomplaatsen) in de universiteit zelf. Hoho, roepen de ingenieursopleiders, met wat moeite kan je misschien nog toegeven dat de promotie-a.i.o.'s in de plaats kunnen komen van ander onderzoekspersoneel, maar de toekomstige ontwerpers betekenen juist een extra beroep op de staf: die komen om les te krijgen.

Is het antwoord daarop het 'herenaccoord'? Ik zou niet graag een baan nemen die het daarvan moet hebben. Dat is nl. een accoord tussen de centrale ondernemersorganisatie en de heer Deetman, waarbij de organisaties zeggen dat 'het bedrijfsleven' (wie is daarop aanspreekbaar?) in principe bereid is om opleidingen waarbij het direct belang heeft te steunen door middel van contract-research (het nut daarvan voor de personeelsvoorziening voor een opleidingsprogramma springt niet direct in het oog), het eventueel beschikbaar stellen van personeel en apparatuur. Bedragen, aantallen, bedrijven of opleidingssoorten zijn niet genoemd.

Over acht maanden staan de eerste studenten voor de deur, en op dit moment is er nog niets duidelijk. Moeten we deregulering dan toch begrijpen als ontregeling?

A. de Kool

Raketten

Recente ontwikkelingen in de militaire technologie, om nog maar te zwijgen van ontwikkelingen die de komende jaren te voorzien zijn, leiden ertoe dat militaire raketten steeds nauwkeuriger en intelligenter worden. Het artikel van Mondini, op pag. 792 e.v., laat zien wat deze ontwikkelingen zijn. Het wordt meer en meer mogelijk om raketten, zelfs over zeer grote afstanden, precies op hun doel te brengen. Zij zoeken daarbij steeds meer zelf hun doel op en vallen het aan, zonder dat er nog enige menselijke bemoeienis nodig is. De kans dat een eenmaal opgespoord doel vernietigd wordt, nadert de 100 procent.

De nog altijd groeiende rol van geautomatiseerde commando-, geleidings- en communicatiesystemen, draagt er bovendien toe bij dat de mogelijkheden om nog in te grijpen in een eenmaal in gang gezette aanval, steeds kleiner worden. Tegelijkertijd neemt het destructieve vermogen van conventionele explosieven zo sterk toe dat zij in de toekomst, wat betreft het hitte- en drukeffect, niet zullen onderdoen voor kleine kernwapens.

Binnen de Europese NAVO-landen circuleren een tweetal voorstellen over de manier waarop met deze nieuwe ontwikkelingen omgegaan moet worden. In de eerste plaats is voorgesteld deze wapens te gebruiken voor het aanvallen van vijandelijke troepen, ver achter de bestaande linies (strike deep). Volgens het zgn. FOFA-concept (Follow-On Forces Attack), zouden vijandelijke troepen, die op weg zijn naar het front, al op 300 tot 500 km achter de linies aangevallen moeten worden. Dit zou dan moeten gebeuren met zeer accurate lange-afstandsraketten met sterke conventionele ladingen.

Anderzijds bestaat de gedachte om met conventionele wapens uitgeruste strijdkrachten vooral defensieve taken te laten verrichten. Men gaat er daarbij van uit dat de huidige technologie, voor zover dat valt te overzien, 'cost-effective' kan worden toegepast in verdedigende concepten. Dat wil zeggen dat de verdediging zo sterk is, dat een versterking van de offensieve kracht van de tegenstander daar niet tegen opweegt. Men wil dan ook dat de militaire strategen zich meer op de verdediging dan op de aanval gaan concentreren.

Er bestaan ernstige bezwaren tegen de eerstgenoemde 'strike-deep'-benadering. De voorzieningen daarvoor zijn erg duur en zullen zeker op grote weerstanden onder de bevolking stuiten. Bovendien vergroten ze de instabiliteit in crisissituaties alleen maar. Omdat een dergelijke strategie veel offensiever is dan de officiële NAVO-strategie, zullen de verhoudingen tussen Oost en West er alleen maar door verslechteren, een politiek gericht op ontspanning wordt moeilijker en de lopende wapenbesprekingen worden er zeker negatief door beïnvloed. Een defensieve strategie, op basis van conventionele wapens heeft deze nadelen niet. Het zal echter moeilijk zijn de NAVO achter een dergelijke strategie te krijgen. Een louter verdedigende houding ligt militairen slecht en bovendien zijn juist de West-Duitsers, op wier grondgebied een eventuele slag gestreden zou worden, alleen al daarom geporteerd voor een meer offensieve strategie.

Mocht de NAVO echter zo ver komen dat zij kiest voor een conventionele afweer (gebaseerd op anti-tank-, anti-vliegtuig- en anti-schipraketten met de bijbehorende technologie), dan zou de zaak van de vrede in Europa zeker een stap verder zijn. Het zou ook zeker een stap op weg naar nucleaire ontwapening betekenen.

NATUUR'85 &TECHNIEK

Prof. dr. Frank Barnaby

(Voormalig directeur Stockholm Internation Peace Research Institute)

NIELS BOHR

(1885-1962)

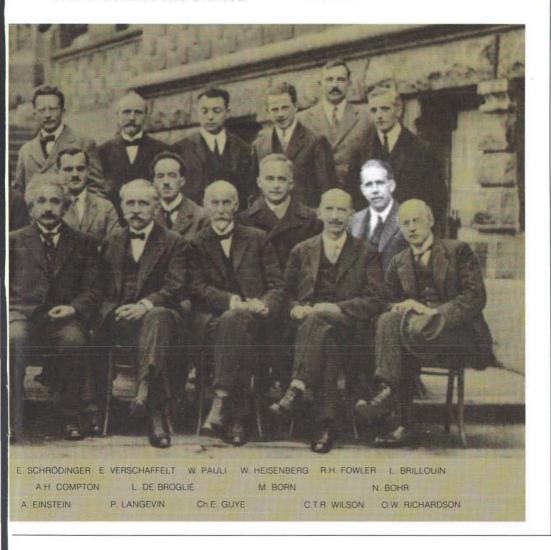
Hans Radder Centrale Interfaculteit Vrije Universiteit Amsterdam



Fysicus/filosoof

Beroemde kunstenaars, politici en ook wetenschappers, worden minstens twee keer per eeuw herdacht: ter gelegenheid van hun geboorte- en van hun sterfjaar. Vandaar dit artikel over de Deense theoretisch natuurkundige Niels Hendrik Bohr, die op 7 oktober 1885 geboren werd in Kopenhagen en op 18 november 1962 in diezelfde stad overleed.

In oktober 1927 vond te Brussel een belangwekkend wetenschappelijk congres plaats. Veel leidende fysici op het gebied van de atoomtheorie en kwantumtheorie waren aanwezig. Hoewel het onderwerp eigenlijk Elektronen en Fotonen was, ging de meeste aandacht uit naar de problematiek van de interpretatie van de nieuwe kwantumtheorie van Heisenberg en Schrödinger. Er vond de eerste expliciete confrontatie plaats tussen Bohr en Einstein over de door Heisenberg opgestelde onzekerheidsrelaties en de door Bohr geformuleerde complementariteits-interpretatie.



Bohr dankt zijn beroemdheid vooral aan zijn bijdragen aan de atoomtheorie en, in het verlengde daarvan, aan het ontstaan van de moderne kwantumtheorie en daarnaast ook aan zijn filosofische beschouwingen over de interpretatieproblemen van deze kwantumtheorie, die uitmondden in de complementariteitsfilosofie.

Tegelijk werd zijn werk echter ook gerelativeerd. Zo zegt bijv. Heisenberg dat Bohr primair een filosoof was en geen fysicus, zodat je je afvraagt waarom Bohr dan in 1922 de Nobelprijs voor natuurkunde gekregen heeft. Anderzijds klaagt Einstein erover dat hij er, ondanks veel inspanning, niet in geslaagd is precies te begrijpen wat Bohr's complementariteitsfilosofie nu eigenlijk inhoudt.

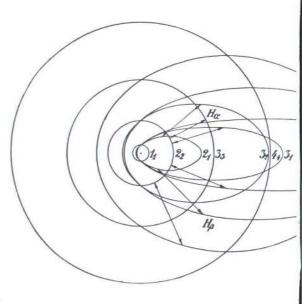
Deze verschillen zijn gedeeltelijk te verklaren op grond van Bohr's stijl en wijze van aanpak. Wat direct opvalt als je zijn artikelen doorbladert, is dat ze veel tekst en relatief weinig formules bevatten. Bohr was meer gericht op het verhelderen en oplossen van concrete fysische problemen (met name via het invoeren van nieuwe begrippen, modellen en methoden) en minder op het leveren van algemeen-theoretische en streng wiskundige beschouwingen. Geen wonder, zou je zeggen, dat een dergelijke benadering botste met de meer formele betoogtrant van bijvoorbeeld Einstein.

Juist deze benadering maakte echter dat Bohr, in een situatie waarin de klassieke natuurkundige theorieën vastliepen op steeds meer onoplosbare problemen, de juiste man op de juiste plaats was. In zo'n situatie komt het er immers op aan zo precies mogelijk na te gaan waar de knelpunten liggen en wat ze inhouden, om van daaruit nieuwe theoretische aanzetten ter oplossing te kunnen voorstellen. Maar stel eens dat Bohr's meest actieve periode tussen 1930 en 1955 gelegen zou hebben. In die tijd ging het in de natuurkunde niet zozeer om een begripsmatige vernieuwing, maar vooral om de verdere uitbouw en verfijning van een min of meer vaststaand theoretisch kader, te weten de kwantumtheorie. Ik vermoed dan ook dat in dat geval Bohr heel wat minder in de schijnwerpers had gestaan. Want net als elders is het ook in de wetenschap niet voldoende om de juiste man of vrouw te zijn: om belangrijke bijdragen te kunnen leveren moet je ook in geschikte omstandigheden, op de juiste plaats en tijd, terecht komen.

Zoals gezegd was dit bij Bohr het geval. In dit artikel zal ik ingaan op drie van zijn bijdragen. Op de atoomtheorie, die hij in 1913 voorstelde en in de jaren daarop verder uitwerkte; op het correspondentieprincipe en de rol die dit speelde bij het ontstaan van de moderne kwantumtheorie in 1925; en tenslotte op zijn filosofische beschouwingen over hoe we die kwantumtheorie moeten interpreteren.

De atoomtheorie

Bohr's belangrijkste bijdrage aan de natuurkunde is zijn werk over de bouw van atomen. Hierin bracht hij een aantal elementen uit het



fysisch onderzoek van die tijd bij elkaar en smeedde ze aaneen tot een provisorische maar wel zeer vruchtbare theorie van het atoom. Deze elementen waren: het atoommodel van Rutherford, de kwantumtheorie van Planck en Einstein en de experimenteel gevonden relaties tussen de frequenties van de atomaire lijnenspectra.

Sinds ongeveer 1900 waren er verscheidene voorstellen voor atoommodellen in omloop. Bijvoorbeeld van Perrin, Thomson, Nagaoka en Rutherford. Deze modellen hadden met elkaar gemeen dat een atoom opgevat werd als een samenstelling van positieve en negatieve

elektrische ladingen. Dat wil zeggen dat het oude idee van een atoom (a-tomos, Gr. = niet-deelbaar) als één geheel en principieel ondeelbaar hier verlaten werd.

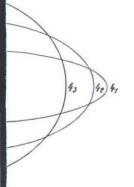
In Rutherford's model is de positieve lading geconcentreerd in een zeer kleine kern. Om deze kern draait een aantal elektronen, ieder met een negatieve elektrische lading – e. Ieder element uit het periodiek systeem heeft zijn eigen aantal elektronen op een zodanige manier dat bij ieder element de elektronen precies de kernladingen compenseren. Het atoom is dus als geheel elektrisch neutraal. Het eenvoudigste voorbeeld is waterstof: dit bestaat uit een kern met lading + e en één elektron met lading – e.

Het elektron beschrijft in het algemeen elliptische (Kepler)banen om de kern.

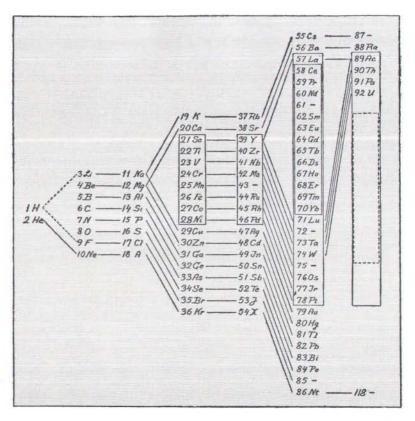
Dit atoommodel van Rutherford liet echter een aantal vragen onbeantwoord. Ten eerste ligt de diameter van de banen niet vast. Atomen van hetzelfde element kunnen een verschillende afmeting hebben. Dit is niet aannemelijk, omdat in feite al deze atomen dezelfde empirische eigenschappen hebben. Ten tweede zouden de elektronen volgens de klassieke elektrodynamica van Maxwell, net als dipolen, elektromagnetische straling moeten uitzenden; en wel in een continu proces, waarbij hun afstand tot de kern steeds kleiner zou worden. Het Rutherford-atoom is dus niet stabiel.

Links: Fig. 1. Een voorbeeld van de discrete banen in Bohr's atoommodel. Het middelpunt van de cirkels is de kern, de kleinste cirkel de grondtoestand. Hoe groter de cirkel of ellips, des te hoger de energie. Door energietoevoer

van buitenaf kunnen elektronen uit de grondtoestand naar banen met hogere energie (de zgn. aangeslagen toestanden) springen. Van daaruit zullen ze echter in korte tijd weer terugspringen naar banen met lagere energie.



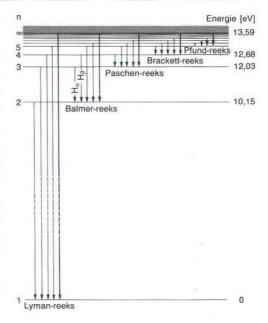
Rechts: Fig. 2. Zo presenteerde Bohr 1922 het periodieke systeem van elementen. De lijnen verbinden elementen van een zelfde chemische familie. De open plekken voorspellen nog niet ontdekte elementen. Zo werd in 1922 in Bohr's instituut experimenteel element 72 gevonden door Coster en Hevesy. Het kreeg de latijnse naam van Kopenhagen: Hafnium.



Daarom stelde Bohr in 1913 een aantal postulaten op:

- Niet alle banen die op grond van de klassieke mechanica denkbaar zijn, kunnen ook werkelijk bezet worden door elektronen. Slechts een beperkt aantal, de zogenaamde 'stationaire toestanden', die ieder een welbepaalde energie hebben, is 'toegestaan'.
- Er is een grondtoestand, die de laagste energie heeft en waarin het elektron zich normaliter bevindt. Deze grondtoestand legt de grootte van een normaal atoom vast (zie figuur 1).
- Uitzending van straling vindt alleen plaats wanneer een elektron van een baan met hogere energie (E_2) overspringt naar een baan met lagere energie (E_1), waarbij de frequentie van deze straling gegeven wordt door:

$$h\nu = E_2 - E_1$$
 (1)
(h is de constante van Planck).





Wat Bohr deed was echter niet alleen het poneren van postulaten om problemen te ontlopen. Zijn model leverde ook positieve resultaten op, namelijk een theoretische verklaring van het ontstaan van de spectra. Ieder atoom heeft zijn eigen karakteristieke spectrum, dat bestaat uit een aantal lijnen met een welbepaalde frequentie. Experimenteel was gebleken dat deze frequenties geordend kunnen worden in reeksen van verschillen tussen twee termen. Zo kan de Balmerreeks van waterstof geschreven worden als:

$$\nu_{\rm n,2} = R(1/2^2 - 1/n^2) \tag{2}$$

(R is een constante; n is een geheel getal groter dan 2 en voor verschillende waarden van n krijgen we verschillende spectraallijnen).

Als we nu, met Bohr, (2) met h vermenigvuldigen en het resultaat vergelijken met (1), zien we dat we de Balmerformule kunnen interpreteren in termen van energieverschillen tussen discrete elektronenbanen. Welke de toegestane energieën zijn, bepaalt Bohr dus op grond van de experimentele gegevens over de spectra.

Successen

De grootste successen boekte Bohr's theorie juist op het terrein van de spectraalreeksen, met name die van waterstof. Niet alleen verklaarde zijn model het waarom van de Balmerreeks, maar er volgden ook allerlei nieuwe voorspellingen uit. Immers, de Balmerreeks ontstaat door elektronensprongen in waterstof van hogere banen naar de *tweede* baan toe. Dan moeten er echter nog andere reeksen bestaan, op grond van overgangen naar de eerste, de derde, de vierde, de vijfde baan. Deze waren en werden inderdaad gevonden: door Lyman in 1914, door Paschen in 1908, door

Brackett in 1922 en door Pfund in 1924 (zie figuur 3). Daarnaast was de theorie ook succesvol ten aanzien van de spectra van 'waterstofachtige' stoffen, zoals geïoniseerd helium.

Bij de verdere uitbouw van de theorie, in de eerste jaren na 1913, waren natuurlijk ook anderen betrokken. Vooral het werk van de Duitse natuurkundige Arnold Sommerfeld was hierbij van groot belang. Sommigen spreken op grond daarvan zelfs van de Bohr-Sommerfeld-theorie van het atoom. Sommerfeld formuleerde zgn. kwantumcondities: condities waarmee we uit de klassiek denkbare banen de kwantumtheoretisch toegestane stationaire toestanden kunnen selecteren. Terwijl Bohr deze selectie per geval moest uitvoeren aan de hand van de experimentele spectraalgegevens, vond Sommerfeld een algemene theoretische formule. Hierdoor werd het in principe mogelijk Bohr's theorie ook toe te passen op atomen met meer dan één elektron.

Ook realiseerde Sommerfeld zich dat de snelheid van de elektronen niet klein is vergeleken met de lichtsnelheid. Dat betekent dat we niet de klassieke, de Newtoniaanse mechanica, maar de relativistische, de Einsteinse mechanica moeten gebruiken bij de berekening van de bewegingen in de elektronenbanen. Door deze berekening uit te voeren slaagde Sommerfeld erin de 'fijnstructuur' van de waterstofspectra te bepalen: het feit dat de lijnen, op grond van dit relativistische effect, opgesplitst zijn in meerdere componenten. Sommerfeld's berekeningen bleken, kwalitatief én kwantitatief, uitstekend te kloppen met onder andere de experimenten van Paschen uit 1916.

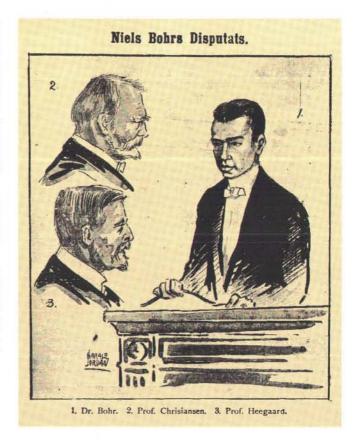
Problemen

Ondanks deze successen had de theorie ook te kampen met problemen, een feit waarvan juist Bohr zich terdege bewust was. Twee daar-

Linksboven: Fig. 3. Het energieniveauschema van waterstof met de verschillende spectraalreeksen. De getallen 1, 2, ..., n nummeren de energieën van opeenvolgende stationaire toestanden. De energie van de grondtoestand (n = 1) is op nul gesteld. Hoe groter de afstand tussen twee toestanden, des te hoger de frequentie van de straling die uitgezonden wordt bij een overgang van de ene naar de andere. Zo ligt de Lymanreeks in het ultraviolette deel van het spectrum, de Balmerreeks in het zichtbare (het optische) deel en de reeksen van Paschen, Brackett en Pfund in het infrarode gedeelte.

Links: Fig. 4. Lijnen van de Balmerreeks van het waterstofspectrum. De rode lijn correspondeert met de overgang van niveau E₃ naar E₂, de blauwgroene lijn met de overgang van E₄ naar E₂, enz.

Rechts: Met deze prent en een verslagje bracht het Deense dagblad Dagbladet de promotie van Niels Bohr, op 13 mei 1911. De titel van de dissertatie luidde: Studier over Metallernes Elektrontheori (elektrontheorie van metalen). Een belangrijke conclusie was dat de klassieke mechanica niet toereikend was om de problemen op dit terrein op te lossen.



733

van wil ik hier behandelen.

Ten eerste het probleem van de instabiliteit van Bohr's atoommodel. Deze instabiliteit is zowel elektrodynamisch als mechanisch van aard. De elektrodynamische of stralingsinstabiliteit zijn we al tegengekomen bij de bespreking van het Rutherfordmodel. Bohr had gewoon geponeerd dat de stationaire toestanden wel stabiel zijn, dus in strijd met de Maxwelltheorie. Ook al klopte zijn model beter met de experimentele gegevens, toch bleef deze strijdigheid met een zo succesvolle theorie als die van Maxwell problematisch.

Mechanische instabiliteit krijgen we bij atomen met meer dan één elektron. Het blijkt dat de elektronen, als hun relatieve plaats en snelheid iets verandert, niet altijd terugkeren naar hun oorspronkelijke baan; door hun onderlinge afstoting verwijderen ze zich steeds verder van elkaar en van de kern, met als resultaat dat het atoom na verloop van tijd uiteen valt. Op grond hiervan is Bohr's theorie innerlijk tegenstrijdig. Enerzijds is de klassieke mechanica wezenlijk nodig om de mogelijke elektronenbanen te berekenen; anderzijds zijn de postulaten van de stabiliteit van de toegestane banen en van de overgangen ertussen strijdig met gevolgtrekkingen uit die theorie.

Deze problemen is Bohr's theorie, ook in haar verdere ontwikkeling, niet te boven gekomen. Waarom werd de theorie dan geaccepteerd en zelfs beschouwd als een belangrijke vooruitgang? Het is duidelijk dat dit gebeurde



Boven: Niels Bohr in het begin van de jaren twintig.

Rechts: Met zijn atoomtheorie bereikte Bohr al snel een hoogtepunt in zijn wetenschappelijke carrière. In 1922 kreeg hij de Nobelprijs voor natuurkunde. Hiernaast het titelblad van de lezing over de atoombouw die hij bij die gelegenheid hield.

LES PRIX NOBEL

EN 1921-1922

OM ATOMERNES BYGNING

Nobelforedrag afholdet i Stockholm

den 11 December 1922

af

NIELS BOHR

STOCKHOLM 1923 IMPRIMERIE ROYALE. P. A. NORSTEDT & FILS 201969 op grond van haar empirische succes, namelijk het verklaren en voorspellen van experimenteel waarneembare verschijnselen, met name van de waterstofspectra. Uit de geschiedenis van de natuurwetenschappen blijkt dat bij het beoordelen van theorieën empirisch succes op de eerste plaats komt en dat andere deugden, zoals consistentie, daaraan vaak ondergeschikt gemaakt worden.

- Een tweede belangrijk probleem voor Bohr's theorie was het volgende. Spectraallijnen worden niet alleen gekenmerkt door hun frequentie, maar ook door hun intensiteit of helderheid. In de klassieke elektrodynamica kunnen zowel de frequentie als de intensiteit van straling bepaald worden met behulp van gegevens over de beweging van het stralende lijk aan de bewegingsfrequentie ω van de elektronen (ofwel de omloopfrequentie rond de kern). Maar voor de atoomspectra blijkt vergelijking (1) te gelden. En de frequenties ν die daarin voorkomen zijn in het algemeen zeer verschillend van de bewegingsfrequenties ω .

Desondanks zag Bohr kans de twee theorieën (de klassieke elektrodynamica en zijn eigen atoomtheorie) aan elkaar te relateren. Het kenmerkende van zijn model is het discrete karakter van de energieën van de elektronenbanen. Echter: in het gebied waar n groot is verschillen opeenvolgende banen weinig van elkaar in energie; ze zijn daar zo goed als continu. In dit gebied lijkt de situatie dus klassiek. Daarom neemt Bohr aan dat in dit domein de kwantumfrequenties ν en de klassieke frequen-

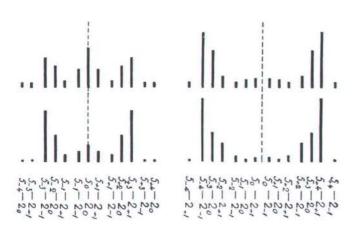


Fig. 5. Vergelijking van theoretisch berekende en experimenteel gemeten intensiteiten voor twee groepen van lijnen in het spectrum van waterstof. In de bovenste helft van de figuur staan de experimentele resultaten van Paschen, in de onderste helft de berekeningen van Kramers. De lengte van de lijnen is een maat voor de relatieve intensiteit binnen de groep. De getallen onder iedere lijn duiden de twee stationaire toestanden aan waartussen de betreffende overgang heeft plaatsgevonden. Zoals we zien wordt het algemene patroon goed gereproduceerd door de theorie maar laat de kwantitatieve overeenstemming nog te wensen over.

deeltje. In Bohr's theorie was het echter tot zo ver niet mogelijk ook maar iets te zeggen over intensiteiten. Deze theorie was dus duidelijk onvolledig en – theoretisch gezien – inferieur aan de klassieke theorie. Maar in de jaren 1917 en 1918 slaagde Bohr erin ook intensiteiten een plaats te geven in zijn theorie. Hij deed dit met behulp van het correspondentieprincipe.

Het correspondentieprincipe

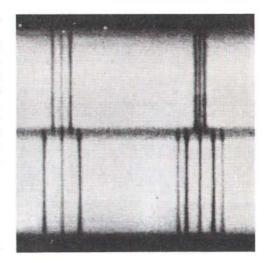
Bohr sprak pas vanaf 1920 van het correspondentie principe, maar de eraan ten grondslag liggende argumentatie vinden we al in 1913. Volgens de klassieke elektrodynamica is de frequentie van de uitgezonden straling geties ω wèl dezelfde numerieke waarden zullen hebben. Ofwel: er is in dit domein een 'correspondentie' tussen de twee frequenties. Op grond van deze aanname berekent hij vervolgens de constante R van vergelijking (2). En het blijkt dat zijn berekening goed klopt met de experimenteel bepaalde waarde van R.

In de jaren 1917 en 1918 lukt het Bohr ook een correspondentie tussen de intenstiteiten uit de twee theorieën op te stellen. Klassiek gezien is het zo dat de intensiteit van de straling die uitgezonden wordt door een periodiek bewegend deeltje bepaald wordt door de amplitude (de maximale uitwijking) ervan. Voor de kwantumtheorie maakt Bohr een tussenstap. Hij neemt aan dat voor banen met grote n de

amplitude de *kans* bepaalt dat een elektron van de ene naar de andere baan zal springen. Uit die kansen kunnen dan, als we een groot aantal atomen hebben, vervolgens de intensiteiten berekend worden. Daarnaast verwacht Bohr dat deze correspondentie ook voor kleine n goede schattingen van de intensiteiten geeft.

Deze ideeën werden preciezer wiskundig geformuleerd en toegepast door de Nederlandse fysicus H.A. Kramers in zijn proefschrift uit 1919. Hij vergeleek zijn resultaten met de metingen van Stark en Paschen. De overeenstemming was zeker niet exact, maar werd door hem toch als 'suggestief' resp. 'overtuigend' beoordeeld (zie figuur 5).

Ook in deze episode zien we Bohr in een karakteristieke rol. Geleid door zijn atoommodel

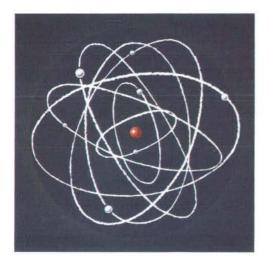


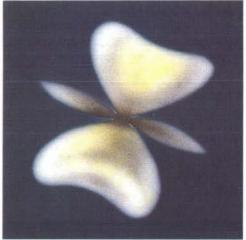


Links: Einstein en Bohr in 1930 bij een congres. Ze hebben zeker van 1924 tot 1949 gedebatteerd over een juiste interpretatie van de kwantumtheorie. In hun discussie speelden gedachtenexperimenten een grote rol. Een van de bekendste is het zgn. Einstein-Podolski-Rosen-experiment uit 1935. De implicaties daarvan houden de gemoederen in de filosofie van de kwantummechanica nog steeds bezig.

Boven: Een voorbeeld van het Zeeman-effect. Een natrium D_1 en D_2 lijn worden in een magnetisch veld opgesplitst. De centrale absorptielijn is een gevolg van natrium in de lichtbron, die niet in het magneetveld staat.

Rechtsboven: Fig. 6. In het atoommodel van Bohr worden de elektronen voorgesteld als bewegend in discrete banen rond de kern. In de moderne kwantumtheorie is de notie
van een baan vervangen door de
waarschijnlijkheid om een elektron op
een bepaalde plaats aan te treffen.
Voor één van de stationaire toestanden van waterstof geeft de figuur geheel rechts de 'waarschijnlijkheidswolk'.





en de experimentele gegevens komt hij tot de formulering van subtiele maar nog speculatieve veronderstellingen. Hiermee alleen komt wetenschap echter niet verder. Dergelijke veronderstellingen moeten vervolgens gedetailleerd wiskundig uitgewerkt en op concrete gevallen toegespitst worden, zodat ze te toetsen zijn aan de hand van specifieke experimenten. Deze taak vervulde met name Kramers, die gedurende tien jaar (van 1916 tot 1926) Bohr's naaste medewerker in Kopenhagen was.

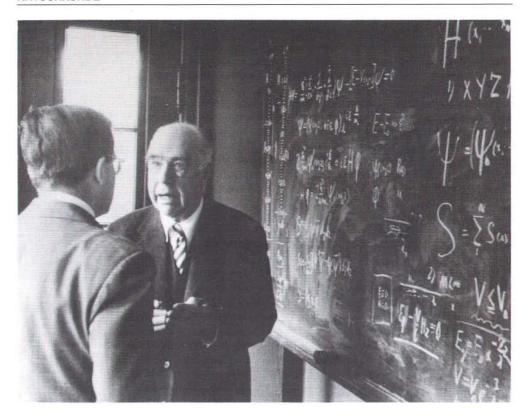
Door deze uitbreiding van zijn theorie zag Bohr in deze en volgende jaren de toekomst met optimisme tegemoet. Hij stelde nu het correspondentieprincipe voor als een 'algemene wet', die (op een bepaalde manier toegepast) voor *alle* banen (met grote én kleine n) zou gelden. Met behulp van dit principe zouden de eerder genoemde problemen opgelost kunnen worden. Op deze manier zou de kwantumtheorie een 'rationele generalisatie' vormen van de klassieke theorieën.

Een nieuwe revolutie

In de jaren 1922 tot 1926 bleek echter dat Bohr's optimisme onterecht was. Steeds meer problemen stapelden zich op voor zijn atoomtheorie en het correspondentieprincipe. Nieuwe hypothesen werden voorgesteld, die ofwel geheel los van Bohr's theorie stonden ofwel ermee in strijd waren. Drie belangrijke aspecten van deze ontwikkeling wil ik hier noemen. (Kortheidshalve vermeld ik hier alleen de theoretische bijdragen. Men moet zich echter realiseren dat al deze ontwikkelingen plaatsvonden in een directe wisselwerking met steeds nauwkeuriger en uitgebreider experimenten.)

Ten eerste bleek uit gedetailleerde berekeningen van o.a. Kramers, Van Vleck, Born en Heisenberg, dat de stabiliteit en de energieën van zelfs het eenvoudigste meer-elektronatoom, helium met zijn twee elektronen, niet verklaard konden worden op grond van Bohr's theorie. Verder was er het Zeemaneffect, dat wil zeggen: de opsplitsing van spectraallijnen in componenten onder invloed van een magnetisch veld. Ter verklaring van deze gecompliceerde spectra werden gedurfde nieuwe hypothesen opgesteld: het uitsluitingsprincipe (door Pauli) en de aanname van de elektronspin (door Goudsmit en Uhlenbeck). Beide waren niet of nauwelijks verenigbaar met Bohr's banenmodel. En tenslotte leverde de wisselwerking tussen straling en atomen (zoals bij dispersie en fluorescentie) onoverkomelijke problemen op. Dit leidde tot een nieuw atoommodel: het zogeheten virtuele-veld-model, waaraan Kramers, Born, Pauli en Heisenberg de belangrijkste bijdragen geleverd hebben.

Dit alles culmineerde in de jaren 1925-1926 in de moderne kwantumtheorie, in de vorm van Heisenberg's matrixmechanica. Het betekende het einde van Bohr's atoomtheorie, die sindsdien ook aangeduid wordt als de 'oude kwantumtheorie'.



Het correspondentieprincipe, in bovengenoemde zin van een algemene wet, was niet geldig gebleken. En het idee van elektronenbanen en van in principe via de klassieke mechanica te beschrijven overgangen ertussen werd verlaten. In plaats van dit laatste werkte de nieuwe theorie met overgangswaarschijnlijkheden tussen stationaire toestanden, waarbij geheel afgezien werd van een deterministische beschrijving zoals die door de klassieke mechanica gegeven werd.

Dit alles betekent niet dat Bohr's bijdragen voor de huidige natuurkunde geen waarde meer hebben. Vooral het idee van de discreetheid en van de stationariteit van de elektrontoestanden vormt nog steeds de basis van de atoomtheorie (het impliceert bijv. de mogelijkheid van de laser). Ook de relatie tussen energie en frequentie $(E=h\nu)$ is algemeen geldig gebleken. En tenslotte wordt ook de notie van een correspondentie tussen klassieke en kwantumtheorie, zij het in een andere vorm dan bij Bohr, nog steeds veelvuldig toegepast.

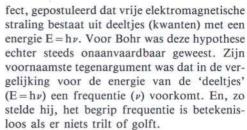


Bohr's interpretatie van de kwantumtheorie

De moderne kwantumtheorie boekte in een paar jaar verbluffend veel empirische successen. Maar de filosofische interpretatie ervan leverde, en levert nog steeds, grote problemen op. Bij de pogingen deze op te lossen speelde Bohr opnieuw een hoofdrol. Bohr's uitgangspunt was steeds geweest een kwantumtheorie te construeren als een rationele generalisatie van de klassieke theorieën. Zoals gezegd verschilt de inhoudelijke beschrijving van atomen en de erdoor uitgezonden straling in Bohr's theorie radicaal van die in de moderne kwantumtheorie. Het correspondentieprincipe als algemene wet gaat niet op. Dit leidt, gezien Bohr's uitgangspunt, tot de vraag op welke manier de kwantumtheorie dan wel een rationele generalisatie van de klassieke theorieën is. Bohr's antwoord is vervat in zijn complementariteitsfilosofie.

De notie van complementariteit kan gezien worden als een generalisatie van het golfdeeltje-dualisme. Hierover was tussen 1905 en 1925 een langdurig en soms verhit debat gevoerd onder natuurkundigen. Einstein had in 1905, ter verklaring van het foto-elektrisch ef-

Bohr en zijn zoon Aage (linksboven), die in 1975 de Nobelprijs voor natuurkunde kreeg. De foto links toont Bohr en zijn medewerker Heisenberg tijdens een lunchpauze in het Instituut voor Theoretische Fysica in Kopenhagen, later Niels Bohr Instituut genoemd.



Maar vanaf ongeveer 1925 zag Bohr in dat het golf-deeltje-dualisme op een of andere manier aanvaard moest worden. De vraag was op welke manier. Hoe kan iets nu eens een golf zijn (die zich uitstrekt over een groot deel van de ruimte) en dan weer een deeltje (dat altijd gelokaliseerd is op een vrij nauwkeurig bepaalbare plaats)? Volgens Bohr is een dergelijke vraag voor de kwantumtheorie verkeerd gesteld. In het domein van de microscopische verschijnselen, waarop de kwantumtheorie betrekking heeft, kunnen we niet spreken van deeltjes of golven als objecten die 'op zich' bestaan, onafhankelijk van de manier waarop we ermee experimenteren. Op grond van het kwantumkarakter van de wisselwerking tussen de experimentele opstelling en het object in kwestie kan dit object in de ene opstelling als deeltje en in de andere als golf verschijnen. Deze twee verschijningswijzen noemt Bohr complementair: enerzijds sluiten ze elkaar uit, in de zin dat de experimentele opstellingen die nodig zijn om het golfkarakter vast te stellen principieel de bepaling van het deeltjeskarakter onmogelijk maken; anderzijds vullen ze elkaar aan, in de zin dat ze beide nodig zijn om te komen tot een adequate en volledige beschrijving van het object in kwestie (zie het intermezzo).

Op deze manier relativeert Bohr het klassieke objectbegrip: in de kwantumtheorie hebben we niet te maken met 'objecten op zich' maar steeds met 'objecten in relatie tot een bepaalde experimentele opstelling'. Maar als zo'n opstelling eenmaal gekozen is, dan kunnen we ook op een ondubbelzinnige manier klassieke begrippen als golf of deeltje blijven gebruiken.

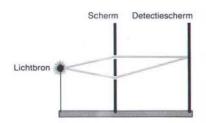
Tot zover Bohr's interpretatie van de kwantumtheorie, waarvan ik hier één aspect globaal gereconstrueerd heb. Met opzet zeg ik 'gereconstrueerd' en niet 'weergegeven'. Want Einstein is niet de enige die moeite had/heeft met het precies begrijpen van Bohr's standpunt.



De complementariteit van golf en deeltje

Het golf- en het deeltjesaspect zijn volgens Bohr complementaire kenmerken van (microscopische) verschijnselen, die tot uitdrukking komen in elkaar wederzijds uitsluitende experimentele opstellingen. We kunnen dit toelichten met behulp van Young's twee-spleten-experiment (zie de figuur hieronder).

De bron L zendt monochromatische straling uit, die door twee openingen in het scherm S het detectiescherm D bereikt. Is deze straling nu een golf- of een deeltjesverschijnsel? Als het een golf is, dan moeten we op D een interferentiepatroon zien. De clou is echter dat we zo'n patroon alleen

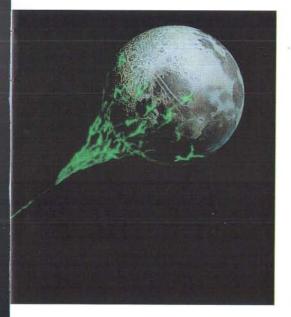


Rechts: Het golf-deeltjedualisme is niet beperkt gebleven tot de elektromagnetische straling. Ook andere velden zijn 'gekwantiseerd'. Er bestaan bijvoorbeeld theorieën in termen van zwaartekrachtsgolven en zwaartekrachtsdeeltjes. De laatste bestaan voorlopig slechts in theorie en heten gravitonen.





Bohr in 1958 in Israël. Hij was er eregast bij de opening van een kernfysisch laboratorium.



te zien krijgen als de twee spleten tijdens het experiment niet 'van plaats veranderen'. Dan moeten L, S en D vast met elkaar verbonden zijn en ten opzichte van elkaar niet kunnen bewegen.

Anderzijds: als de straling een deeltjesverschijnsel is, moeten we in principe kunnen bepalen door welk van de twee spleten in S ieder deeltje (foton) gegaan is op zijn weg van L naar D. Dit kunnen we doen door de impulsoverdracht van het foton aan het scherm S te meten (deze is namelijk voor de bovenste en onderste spleet verschillend). Het punt is nu dat, om deze impulsoverdracht te kunnen meten, S beweegbaar moet zijn ten opzichte van de gemeenschappelijke basis.

De conclusie is dat voor het vaststellen van het golfkarakter S niet beweegbaar moet zijn, terwijl voor de bepaling van het deeltjeskarakter deze opstelling zó gewijzigd moet worden, dat S juist wel beweegbaar is. Het zal duidelijk zijn dat we aan beide eisen niet tegelijk kunnen voldoen. Dit soort verschijnselen noemt Bohr daarom 'complementair'.

Ook in zijn filosofische beschouwingen is de aanpak van Bohr namelijk meer intuïtief, meer zoekend en speculatief dan streng formeel argumenterend. Wat we op dit terrein echter missen is een soort 'filosofische Kramers', een naaste medewerker van Bohr die diens op zich belangwekkende filosofische uiteenzettingen nader gepreciseerd en gesystematiseerd heeft. Desalniettemin is de grote lijn van Bohr's standpunt redelijk duidelijk.

In de filosofie van de kwantummechanica is de complementariteitsinterpretatie van grote invloed geweest. Zo tussen 1935 en 1960 vormde deze zelfs het 'orthodoxe' standpunt. Sinds 1960 is de discussie op dit terrein veelzijdiger geworden, omdat allerlei andere interpretaties voorgesteld of verder uitgewerkt zijn. Toch spelen Bohr's opvattingen in deze discussie nog steeds een duidelijke rol. Daarom kunnen we concluderen dat niet alleen de vakwetenschappelijke maar ook de filosofische bijdragen van Bohr van blijvende betekenis gebleken zijn.

Bij de samenstelling van dit artikel hebben we de didactische medewerking gehad van drs. A.L. Ellermeyer, vakdidacticus natuurkunde, Universiteit van Amsterdam.

Literatuur

Heilbron, J.L., Kuhn, T.S., (1969). The genesis of the Bohr atom. Historical studies in the physical sciences I, pag. 211-290. ISBN 8122-7600-0.

Radder, H., (1984). De materiële realisering van wetenschap. VU-uitgeverij, Amsterdam, pag. 135-156. ISBN 90-6256-434-8.

Radder, H., (1979). Bohrs filosofie van de quantummechanica. Analyse en kritiek. Kennis en methode, 3, pag. 411-432.

Feuer, L.S., (1974). Niels Bohr: The ekliptika circle and the Kierkegaardian spirit. In: L.S. Feuer, Einstein and the generations of science. Basic Books, New York, pag. 109-157. ISBN 465-01871-8.

Folse, H.J., (1985). The Philosophy of Niels Bohr. The Framework of Complementarity. North-Holland Publishing Company, Amsterdam. ISBN 0-444-86938-7.

Bronvermelding illustraties

Archief Natuur en Techniek, Maastricht: pag. 728-729, 732, 736 boven, 737.

Niels Bohr Instituut, Kopenhagen: pag. 730, 731, 733, 734 rechts, 735, 736 onder, 738-739, 739.

A.I.P. Niels Bohr Library, New York: pag. 734, 738. ABC press, Amsterdam: pag. 740.

Transworld Features, Haarlem: pag. 740-741.

BOHR

Herinneringen aan een leermeester

In dit artikel haalt de auteur een aantal herinneringen op over Niels Bohr, die 100 jaar geleden in Kopenhagen geboren werd. Bohr komt hierin naar voren als een eminent onderzoeker, die door zijn onorthodoxe houding en visie op zowel wetenschappelijke als meer dagelijkse zaken vele vrienden om zich heen verzamelde. Vooral zijn visie op de bouw van atomen heeft een revolutie in deze tak van de fysica veroorzaakt. Toch kon hij niet iedereen van zijn gelijk overtuigen: zo bleef Einstein tot het einde toe sceptisch over Bohr's ideeën.

Rechts: Bohr bij zijn als gewoonlijk met veel papieren bedekte werktafel. Ook lucifersdoosjes vormden een vast attribuut want Niels was een fervent pijproker.

Onder: Niels Bohr en de toen nog jeugdige auteur van dit artikel omstreeks 1930 in de buurt van Bohr's landhuisje in Tisvilde.





H.B.G. Casimir Heeze



Het is niet mijn bedoeling een overzicht te geven van Bohr's concrete bijdragen tot de moderne natuurkunde: ze zijn algemeen bekend en bij de herdenking van zijn geboortejaar zullen ze ongetwijfeld op vele plaatsen opnieuw naar voren worden gebracht. Evenmin zal ik uitvoerig ingaan op zijn denkbeelden over de grondbeginselen van de natuurbeschrijving, denkbeelden die kunnen worden aangeduid met de woorden correspondentieprincipe en complementariteit. De invloed van Bohr op zijn tijdgenoten was echter veel groter dan valt af te lezen uit zijn, ongetwijfeld indrukwekkende, gepubliceerde oeuvre. Voor mii, en voor velen vóór mij en na mij, is Bohr een leermeester, een raadsman en een vaderlijke vriend geweest. De bijzondere geest die heerste op zijn instituut voor theoretische natuurkunde in Kopenhagen en tijdens de conferenties die daar werden gehouden, de stijl van discussiëren en ook de informele maar toch waardige sfeer bij ontvangsten in het prachtige 'erehuis' dat door de grondvester van de Carlsbergbrouwerij was nagelaten om te worden bewoond door de grootste wetenschapsman van Denemarken, dat alles droeg sterk het stempel van Bohr's persoonlijkheid. Ik hoop dat het mij zal lukken daarvan een impressie weer te geven.

De eerste indruk kon misleidend zijn: een vriendelijke, welwillende en soms wat afwezige man. "You are the foggiest person I've ever come across" (U bent de wazigste persoon die ik ooit ben tegengekomen) schijnt een employé van een scheepvaartmaatschappij te hebben gezegd, toen Bohr in Hawaii aan land was gegaan en bijna de boot miste. Hijzelf vertelde dat later met kennelijk plezier. Men moest hem beter kennen om de helderheid en doordringendheid van zijn denken te leren bewonderen en om in te zien dat zijn schijnbaar langzaam reageren vaak het gevolg was van een snel overwegen van vele, door anderen niet vermoede aspecten van een probleem. Getoetst aan gebruikelijke criteria schoot zijn voordrachtstechniek tekort. Zijn stem was zacht en weinig gearticuleerd en hij zocht voortdurend



jongere broer Harald, een prominent wiskundige en een van de meest briljante voordrachtskunstenaars die ik ooit over wiskunde heb horen spreken. Harald was ook ster van het Deense voetbalelftal geweest, Niels bracht het niet verder dan reservedoelverdediger in een eerste klas elftal. "Hij was eigenlijk uitstekend", zei Harald later over hem, "maar hij was vaak te laat met uitlopen." Niels bleef altijd een sportliefhebber. Hij hield van zeilen, van skiën, van fietsen en van lange wandelingen, waarbij het weer geen rol speelde. "Gezegend weer", heb ik hem horen mompelen, terwijl een felle wind ons ijskoude regen in het gezicht blies.

naar zijn woorden. Dat was geen kwestie van taalbeheersing: het maakte weinig uit of hij Duits, Engels of Deens, zijn moedertaal, sprak. De reden was dat hij bleef zoeken naar een betere formulering, vooral als hij over de grondslagen van de natuurwetenschap sprak. Men kreeg dan niet een perfecte uiteenzetting te horen: men hoorde hem denken. Juist daarom konden zijn voordrachten zo leerrijk zijn, maar het kostte wel inspanning hem te volgen en pas bij het lezen van de uitgewerkte tekst gaf men zich volledig rekenschap van de rijkdom en van de logische precisie van zijn gedachten. Ook bij het opstellen van zijn geschriften bleef hij veranderen. Ik heb hem eens geholpen bij het schrijven van een beoordelingsrapport over een aantal kandidaten voor een hoogleraarschap in Stockholm. Pas de achtste of negende versie werd goedgekeurd. Bij zijn publikaties ging het niet anders en zijn wijze van drukproeven corrigeren moet voor de redacties van tijdschriften een nachtmerrie zijn geweest. Ik herinner mij gedrukte bladzijden waar aan alle kanten stroken met gewijzigde versies waren aangeplakt die het oorspronkelijke drukwerk in omvang verre overtroffen.

Er was wat voordrachtstechniek betreft een groot verschil tussen Niels en zijn twee jaar



Linksboven: Bohr in 1944 op de ski's, in de buurt van Los Alamos in de Verenigde Staten. Hij was daar betrokken bij het Engels-Amerikaanse atoomenergieproject. In 1950 schreef Niels Bohr zijn Open Brief aan de Verenigde Naties, waarin hij zijn ernstige bezorgdheid uitspreekt over de ontwikkeling van atoomwapens en schrijft welke plichten de mensheid zijn opgelegd nu die over kernenergie kan beschikken.

Boven: In de wintertuin van het ruime en stijlvolle 'erehuis' dat Bohr in Karlsberg bewoonde. De stichters van de Carlsbergbrouwerijen hadden dat huis bestemd voor de grootste geleerde van Denemarken.

Autoges Oscilladeus Ligung at von r-a - 5 . f(t,t). De intile blise der almudelige Oscilla telesungelse D(1-a-5) = (i f + v f + w f) (1-a-5) = (a f + 2 f + (c + w) f) (1-a-5) = (a f + 2 f + (c + w) f) (1-a-5) = (a f + 2 f + brether med samme Grad as Televarmere som lidlig re aurende give d-0165=0 Med samme Theornales grad have enderdere # +# = # + # (wi +6 w) - # - # to (wi + 6 a) les A, og Az er de principale Frienring radier De Belingelen der skal vare offsedde for x-a er folquede 2 = 0 a To = 0 Kont . F. + J (t. + t.) a Allsaa 0 = for + for 00 0 + for + for - 10 (a) - 7 in(12-1+62) - p + 2 to for (1) 1 0 -- 2 t it \$ (ila) + i 6 B (+ + +) \$ (ida) + i 6 6 a \$ (ida) (1) 0 - 20 (in f (iba) - # if (iba) + 20 i (in f (ida) - in f (ida) + 6(to \$ (ida) + de \$ (ida) - id 6" (ida) Jammentiakoku jaar * (a) 0 - + + (a & (iba) + + + (iba) + 2 B & (a & (ida) + + + (ida) + 6 (a + d) 9 (ida) - 2 ida fi (ida) (100 - 2 + a \$ (162) + Ba (\$ + \$) \$ (ide) + 6 \$ (ida) (a)+(0) - 1+ + 6 (160) - 8/4 (1 - 4)6 (100) + 216 (100) + 6((1 + 2))6 (100) - 2 ide 6 (100) Loses Lig rungeme faar man B- & 1 (a (+ a) ((iba) (ida) - 2 ida ((iba) (ida) - 2 (iba) (ida)) 6-6 14 (12 (2 + 4) 6 identicion - a (2 - 1) 1 (don't lives - 2 id f i ba) 6 (iden) ides O. & (ide) (ide) (in \$. di) (\$. 8) - 216 ((da) - 21da (\$. 8) (1 (ide))

Een bladzijde uit de door zijn broer Harald Bohr in het net geschreven - beantwoording van een prijsvraag over oppervlaktespanning uit 1905, laat zien dat Niels in zijn jonge jaren niet bang was voor ingewikkelde formules. kreeg voor zijn inzending de gouden medaille van de Deense Koninklijke Akademie van Wetenschappen.

Bohr was zich van zijn tekortkomingen terdege bewust en hij kon er in een voordracht met de serene humor die hem eigen was op zinspelen. Soms was hij er ook wat ongelukkig over, vooral wanneer hij vreesde dat het hem niet was gelukt zijn toehoorders te overtuigen. Enkele jaren na de oorlog — plaats en tijd ben ik vergeten, maar doen ook weinig terzake — was ik toevallig aanwezig toen hij ergens een voordracht hield. Hij zag me en na afloop

kwam hij op me toe en zei: "dat was verschrikkelijk, verschrikkelijk, maar ik hoop dat het toch een klein, klein beetje...." Hij maakte de zin niet af, maar de bedoeling was duidelijk en ik verzekerde hem dat het meer dan "en lille bitte smule", een klein, klein beetje was geweest.

Hoewel Bohr zich bezig hield met moeilijke en abstracte problemen, stond hij toch steeds dicht bij de fysische werkelijkheid. Hij hield



ook van eenvoudige fysische verschijnselen, maakte me er op attent dat de reflecties van een straatlantaren op golvend water steeds verlengd, maar nagenoeg niet verbreed zijn (het kost enige moeite zich zonder papier en potlood de meetkunde voor te stellen), betoogde dat het bij kiskassen belangrijk is de platte steen een zo groot mogelijk impulsmoment om de as loodrecht op het vlak van de steen te geven, en keek met plezier naar een pingpongballetje dansend op een omhoogspuitende straal van een fontein. Hij had gedurende zijn studententijd een gouden medaille verdiend met het beantwoorden van een prijsvraag over de bepaling van de oppervlaktespanning van vloeistoffen door middel van de bestudering van golven op het oppervlak van een vloeistofstraal. Zijn belangstelling voor capillaire verschijnselen bleef bestaan en werd op een hoger niveau toegepast in de jaren dertig, toen hij met veel succes een druppel met oppervlaktespanning gebruikte als model voor een atoomkern. In meer algemene zin was de klassieke fysica voor hem belangrijk, omdat in de limiet

van grote kwantumgetallen de kwantummechanica er in over moet gaan en omdat ze de enige voor ons mogelijke directe voorstelling van de werkelijkheid omvat, een voorstelling die echter in de atomaire wereld maar beperkt toepasbaar is.

Kenmerkend voor Bohr was zijn bereidheid afstand te doen van de klassieke, causale beschrijving en genoegen te nemen met een 'complementaire' beschrijvingswijze: of een elektron zich voordoet als golf dan wel als deeltje hangt af van de experimentele opstelling die steeds in het geheel van een verschijnsel moet worden betrokken. Einstein heeft uiteindelijk wel toegegeven dat de kwantummechanica met Bohr's interpretatie een consistente theorie was die vele verschijnselen adequaat beschrijft, maar hield haar toch voor onvolledig en meende dat er uiteindelijk iets geheel anders voor in de plaats zou moeten komen. Bohr meende daarentegen dat de kwantummechanische beschrijving zo volledig is als zij, gezien de geaardheid van de natuur, waarvan wij zelf deel uitmaken, ooit zal kunnen zijn. Het is

Links: Bohr en Pauli kijken geamuseerd en met belangstelling naar de 'tippetop', een in Denemarken uitgevonden tolletje dat zich altijd opricht en dat een tijd lang ook buiten Denemarken populair was. Wolfgang Pauli heeft een zeer belangrijke bijdrage geleverd aan de kwantummechanica en kreeg daarvoor in 1945 de Nobelprijs.

Onder: Niels Bohr en zijn bewonderenswaardige echtgenote Margrethe op latere leeftijd.



der op de voorgrond. Lange berekeningen liet hij aan anderen over en tot het wiskundig apparaat van de nieuwe kwantummechanica heeft hij weinig bijgedragen. De essenties doorzag hij echter verbluffend goed en ik zou een voorbeeld kunnen beschrijven (maar het zou te veel tijd kosten) waarbij hij met enkele woorden me weer op de goede weg hielp toen ik in een probleem was vastgelopen. Bohr had ook een bijzonder goed gevoel voor de orde van grootte van verschijnselen.

In Bohr's geschriften wordt herhaaldelijk betoogd dat streven naar harmonie een essentieel element van wetenschappelijk onderzoek is. Voor Bohrs eigen werk was dat zeker het geval, en harmonie zocht en vond hij ook in zijn persoonlijk leven. Wel kon hij fysische problemen strijdlustig te lijf gaan, wel kon hij met zachte, maar werkzame nadruk opkomen voor de belangen van zijn instituut, maar agressie was hem vreemd. Ik wil daarom besluiten met de volgende anecdote.

Na een voordracht in Moskou werd aan Bohr gevraagd waaraan hij het toeschreef dat hij zoveel voortreffelijke leerlingen had gehad. Hij antwoordde: "misschien was dat, omdat ik nooit bang was hun te vertellen dat ik een stommeling was geweest". Lifschitz, die moest vertalen, maakte daarvan: "misschien omdat ik nooit bang was hun te vertellen dat ze stommelingen waren". Toen interrumpeerde iemand uit het gehoor, de bekende fysicus Ginzburg, maakte opmerkzaam op de fout en voegde er aan toe: "en dat is geen toevallige vergissing". Lifschitz was naaste medewerker van Landau, die bekend was om zijn agressieve optreden. Landau had wel bij Bohr gewerkt, bewonderde hem, maar de harmonie die Bohr wist te vinden heeft hij wellicht niet eens gezocht.

voor Bohr een teleurstelling geweest dat hij Einstein niet heeft kunnen overtuigen. De overgrote meerderheid van de fysici is echter met hem meegegaan en zijn school is uiterst vruchtbaar gebleken.

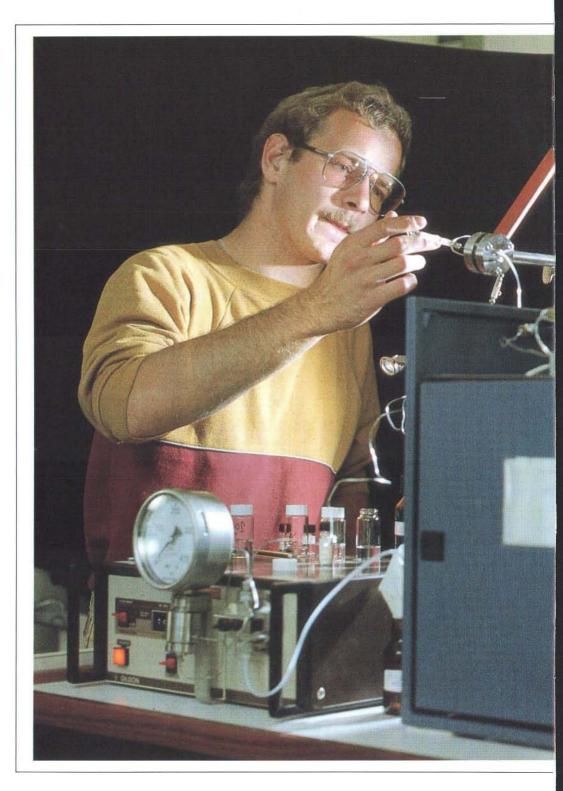
In zijn jongere jaren, in zijn prijsvraag en in zijn dissertatie over elektronen in metalen, toont Bohr een niet geringe mathematische vaardigheid. Een proeve daarvan is te vinden op pagina 745. Later treedt de wiskunde min-

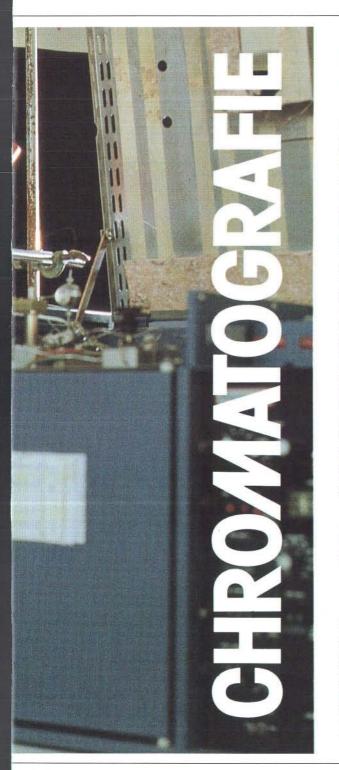
Literatuur

Rozental, S. (ed.), (1985). Niels Bohr. His life and work as seen by his friends and colleagues. North-Holland Publishing Company, Amsterdam. ISBN 0 444 869778.

Bronvermelding illustraties

Niels Bohr Instituut, Kopenhagen: pag. 742, 745. ABC press, Amsterdam: pag. 742-743, 744 onder, 747. EST Mondadori, Milaan: pag. 744 boven. J.H. Schultz Forlag, Kopenhagen: pag. 746.





De kunst van het scheiden

De chromatografie is een chemische scheidingstechniek die de afgelopen tijd een stormachtige ontwikkeling heeft doorgemaakt. De chromatografie omvat een aantal deelgebieden, die alle gemeen hebben dat ze te analyseren monsters in hun afzonderlijke componenten scheiden en basis geven aan het woord 'scheikunde'. De chromatografie is gebaseerd op het gegeven dat iedere stof een bepaalde, eigen affiniteit heeft tot een gas, een vloeistof, of een vaste stof. Zodoende kan men stoffen van elkaar scheiden wanneer men twee fasen langs elkaar laat stromen; de ene stof zal zich namelijk gemakkelijker door een (stromende) fase laten meevoeren dan de andere.

U.A.Th. Brinkman

Vakgroep Algemene en Analytische Chemie Subfaculteit der Scheikunde Vrije Universiteit Amsterdam

Gaschromatografie (GC) en hogeprestatie vloeistofschromatografie (HPLC) zijn tegenwoordig de twee belangrijkste scheidingstechnieken. In steeds meer gevallen wordt geprobeerd de voordelen van beide methoden te verenigen. Hier is een HPLC-scheidingssysteem (links: pomp; midden boven: injectiekraan en kolom) gekoppeld aan een zeer gevoelige stikstof/fosfordetector voor GC, ingebouwd in de GC-oven met bedieningspaneel (midden en rechts).

De kunde van het scheiden

De Zweedse Nobelprijswinnaar Tiselius zei ooit: "There is an old Dutch word for chemistry, scheikunde, which literally means the art of separation. Indeed, separation methods form the basis of chemistry...". De aanduiding 'scheikunde' voor het vakgebied dat in vrijwel alle talen ter wereld als chemistry, chimie, khimia, kemi of iets dergelijks bekend staat, is, zeker in onze tijd, meer dan terecht.

In de laatste twee decennia heeft de ontwikkeling van nieuwe scheidingstechnieken immers een explosieve groei doorgemaakt, die van onschatbare waarde is geweest bij het oplossen van de meest uiteenlopende problemen. Men kan hier denken aan het bepalen van milieuverontreinigende stoffen in oppervlaktewater, bodem en gewassen, aan het ophelderen van de structuur van grote organische (bio)molekulen en aan het ontrafelen van de afbraakroutes van geneesmiddelen in lichaamsvloeistoffen.

De ontwikkelingen op het gebied van de scheidingsmethoden hebben plaatsgevonden over een breed terrein; veel technieken hebben hun steentje bijgedragen. De grootste vooruitgang, met name ook voor wat betreft de praktische toepasbaarheid, is evenwel op het gebied van de *chromatografie* gerealiseerd. In dit artikel en nog twee daaropvolgende besteden we daarom speciaal aandacht aan dit type scheidingstechnieken.

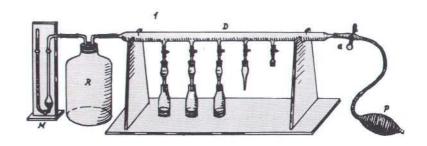
Onderstaand zullen we eerst de historische ontwikkeling van de chromatografie schetsen, waarna een aantal basisbegrippen de revue passeert. De twee belangrijkste deelgebieden van de chromatografie, de gaschromatografie en de kolomvloeistofchromatografie, zullen in de volgende twee artikelen uitgebreid behandeld worden.

De historische ontwikkeling

Het begin: Tsvett

De term 'chromatografie' wordt gebruikt als verzamelnaam voor een serie verwante technieken, die hun oorsprong hebben in het baanbrekende werk dat de Russische botanicus Tsvett en de Amerikaanse petroleumchemicus Day rond de eeuwwisseling hebben verricht. Als inleiding vertellen we iets over het werk van eerstgenoemde, die door de meeste auteurs als de werkelijke grondlegger van de hedendaagse chromatografie wordt beschouwd.

Kort na 1900 verrichtte Tsvett onderzoek naar de samenstelling van de kleurstoffen van bladgroenkorrels, die hoofdzakelijk uit groene chlorofyllen en gele carotenoïden bestaan. Hij bereidde extracten van vers gedroogde, groene bladeren in petroleumether en bracht een kleine hoeveelheid van zo'n extract op een kolom calciumcarbonaatpoeder, dat zich in een glazen buis bevond. Bij langzaam doorspoelen met petroleumether (of met een mengsel van petroleumether en alcohol) bewogen de kleurstoffen zich met verschillende snelheden door de kolom en vormden op den duur een serie groene en gele zones. Tsvett liet de kolom drooglopen, drukte het als adsorbens gebruikte calciumcarbonaat er als een staaf uit en sneed het dan in stukken. Zo kon hij de zones gescheiden van elkaar verzamelen en vervolgens elk afzonderlijk met een geschikt oplosmiddel uit het adsorbens extraheren. (Deze werkwijze wordt tegenwoordig nog slechts sporadisch toegepast. Meestal laat men het adsorbens in de kolom en zet het doorspoelen met de vloeistof, het eluens, voort totdat alle zones na elkaar de onderzijde van de kolom hebben verlaten, waar ze gescheiden opgevangen en gedetecteerd worden.)



Tsvett noemde het door hem ontworpen scheidingsproces *chromatografie*. Zijn werk, dat we kunnen onderbrengen in de rubriek der *vloeistof-vast*chromatografie, bleef enkele tientallen jaren zonder echte resultaten. Pas in de jaren dertig volgde een doorbraak, nadat Kuhn, Winterstein en Lederer in 1931 caroteen in zijn isomere componenten hadden gescheiden, waarbij ze zwavelkoolstof als eluens gebruikten.

Kolom, papier en ...

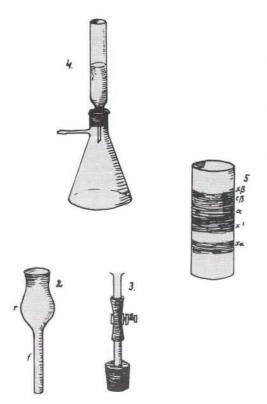
Een volgende belangrijke bijdrage tot de ontwikkeling van de chromatografie werd rond 1940 geleverd door de Britse onderzoekers Martin en Synge, die aminozuren verkregen na hydrolyse (= splitsing) van eiwitten, trachtten te scheiden via tegenstroomverdeling. Dit is een techniek waarbij, wat simplistisch gezegd, twee niet-mengbare vloeistoffen in tegengestelde richting langs elkaar worden gevoerd. Omdat het voor dit doel ontworpen apparaat niet aan de verwachtingen beant-

woordde, probeerden Martin en Synge een van de vloeistoffasen vast te leggen op een inerte drager. Het is immers niet noodzakelijk *beide* vloeistoffen te laten bewegen.

Ze kozen in eerste instantie voor silica (SiO₂) dat tot 70 procent van zijn eigen gewicht aan water kan opnemen zonder vochtig te worden in de gewone zin van het woord. Op deze wijze wordt de ene vloeistoffase stationair, terwijl de andere mobiel blijft. Door de bevochtigde silica in een buis te brengen werd voor deze *vloeistof-vloeistof*chromatografie in feite eenzelfde werkwijze verkregen als voor de door Tsvett ontwikkelde vloeistof-vast-chromatografie.

Later vervingen Martin en zijn medewerkers met succes hun dragermateriaal in een kolom door een vel filtreerpapier, dat ook water als stationaire vloeistoffase vasthoudt. De resultaten van dit onderzoek werden in 1944 vastgelegd in de inmiddels klassieke eerste publikatie over *papier*chromatografie. Deze techniek maakte snelle (kwalitatieve) analyse van relatief kleine hoeveelheden materiaal mogelijk en beleefde een bloeitijd in de jaren vijftig en zestig.

Martin voorzag toen al dat, in plaats van een vloeistof, een gas net zo goed als mobiele fase toegepast zou kunnen worden. Toch duurde het tot 1949 voor Martin en James er toe kwamen dit idee gestalte te geven. Hun eerste publikatie over gas-vloeistofchromatografie die de scheiding behandelde van lagere vetzuren op een kolom van kieselguhr die met siliconenolie geïmpregneerd was, verscheen in 1952. Sindsdien heeft de gaschromatografie zich, zowel wat theorie, analysetechniek als apparatuur betreft, stormachtig ontwikkeld en zij bepaalt ook vandaag de dag nog voor een belangrijk gedeelte het gezicht van de chromatografie.



De door Tsvett gebruikte chromatografische apparatuur (overgenomen uit het oorspronkelijke artikel). Het onder 1 geschetste apparaat was bedoeld voor de scheiding van relatief kleine hoeveelheden plantekleurstoffen; het eigenlijke scheidingskolommetje (diameter 2-3 mm) en het bijbehorende verbindingsstuk vindt men onder 2 resp. 3. De bij 4 weergegeven 2-3 cm wijde trechter werd gebruikt voor het analyseren van grote hoeveelheden monster. Tenslotte ziet men onder 5 het resultaat: een chromatogram.



Rechts: Papier- en dunnelaagchromatografie. De linker figuur toont een vroeg voorbeeld van tweedimensionale scheiding van tien aminozuren m.b.v. papierchromatografie. De te analyseren oplossing is links opgebracht, waarna eerst met fenol-water (80:20) en vervolgens, na 90° draaien van het vel, met sec.-butanol-mierezuurwater (75:15:10) is ontwikkeld (vergelijk Fig. I-3). Het analyseren van inkten levert altijd interessante, zij het niet steeds even fraai gevormde, chromatogrammen op (rechter figuur). Hier is een zevental inkten op een dunnelaagplaat gechromatografeerd met een butanol-ethanol-ammoniak mengsel als eluens.

Links: In 1977 eerden de Britse posterijen ter gelegenheid van het 100-jarig bestaan van de Royal Institute of Chemistry, Martin en Sygne met de hier afgebeelde postzegel. Zoals het randschrift aangeeft, ontvingen de beide onderzoekers in 1952 de Nobelprijs voor hun werk op het gebied van de 'Starch-chromatography'. De ontwerper van de zegel heeft duidelijk laten uitkomen dat Martin en Synge zich zowel met papier- als met kolomchromatografie bezighielden.

... en dunne lagen

Als een verdere bijdrage van essentiële betekenis vermelden we dat de Russische onderzoekers Izmailov en Shraiber reeds in 1938, uit behoefte aan het werken op kleine schaal, de techniek der *dunnelaag*chromatografie invoerden. Zij legden de nadruk op de analogie tussen scheidingen op een kolom en op dunne lagen adsorbens, die uitgestreken zijn op een glazen plaat (zie fig. 1).

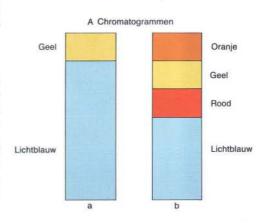
Aanvankelijk was deze vorm van chromatografie als gevolg van allerlei praktische problemen weinig succes beschoren. Het duurde tot 1956-1958 eer men er in slaagde door standaardisatie van de bereiding van de dunne lagen en door methodisch onderzoek van de systeemparameters de bruikbaarheid van de techniek te bewijzen. In het laatste decennium heeft de dunnelaagchromatografie de papierchromatografie, dank zij het doorslaggevende voordeel van scherpere scheidingen in een kortere tijd, volledig verdrongen.

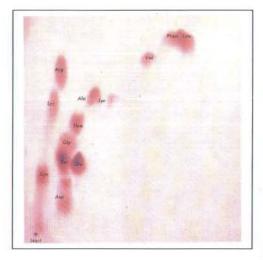
Moderne vloeistofchromatografie

We eindigen deze inleiding met het noemen van het chromatografische hoogtepunt van de jaren zeventig: de onder hoge druk (50-300 bar) uitgevoerde vloeistofchromatografie (HPLC=High Pressure (of Performance) Liquid Chromatography). De stoot tot deze ontwikkeling werd gegeven toen men zich begon te realiseren dat de door Tsvett, Martin, Kuhn en anderen gepropageerde vloeistof-

chromatografische technieken toch wel bijzonder weinig efficiënt waren vergeleken met, met
name, de inmiddels hoog ontwikkelde gaschromatografie. Immers, men moest meestal
voor ieder experiment opnieuw een glazen kolom vullen, de scheiding verliep uiterst langzaam onder hydrostatische druk en men moest
het in talloze afzonderlijke fracties opgevangen kolomeluaat tenslotte in een tijdrovende
séance analyseren.

Onder: Fig. 1. Dunnelaagchromatogrammen van een belladonna-extract, zoals die in 1938 door Izmailov en Shraiber werden vervaardigd. De onderzoekers vergeleken resultaten in kolommen (A) en op dunne lagen (B), door hen ultrachromatogrammen genoemd. Aanvankelijk brachten ze uitsluitend de te onderzoeken oplossing (5 ml resp. 1 druppel) op kolom of dunnelaagplaat aan







Rond 1970 veranderde bovengenoemde situatie in enkele jaren radicaal. Initiatieven vanuit verscheidene laboratoria in de V.S. en Europa leidden tot de invoering van hogedrukpompen, geoptimaliseerde stalen analysekolommen en on-line injectie- en detectiesystemen van de juiste (d.i. zeer kleine) afmeting, om slechts enkele van de meest essentiële vernieuwingen te noemen. Als gevolg van dit alles werd het plotseling mogelijk om schei-

dingen die voordien tenminste een aantal uren vergden in een paar minuten uit te voeren (zie fig. 2).

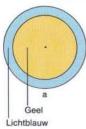
Nu, een tiental jaren later, kan zonder overdrijving gesteld worden dat de moderne vloeistofchromatografie zich naast de gaschromatografie een geheel eigen plaats veroverd heeft bij het oplossen van researchproblemen en het uitvoeren van routine-analyses in het chemische laboratorium.

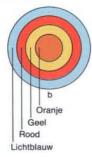
(chromatogrammen a: men spreekt dan van frontale analyse).

Later ontdekten ze dat verder ontwikkelen met een geschikt oplosmiddel een betere scheiding en dus meer informatie opleverde (b: elutie-analyse). Dit in Charkov uitgevoerde onderzoek moest als gevolg van het uitbreken van de Tweede Wereldoorlog worden beëindigd.

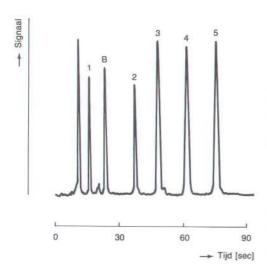
Onder: De Vario KS-Kammer is een geavanceerd type ontwikkeltank voor de dunnelaagchromatografie, waarmee het mogelijk is een scheiding snel te optimaliseren door het per 'baan' gebruiken van een ander eluens of, zoals hier, van een andere relatieve vochtigheid.











De basis van de chromatografie

Indeling

Chromatografie is een verzamelnaam voor die scheidingstechnieken, die berusten op een verdeling van te scheiden verbindingen tussen twee fasen, waarvan de ene, de *mobiele*, stroomt langs de andere, de *stationaire*. De scheiding van de diverse componenten van een mengsel wordt daarbij bewerkstelligd op grond van verschillen in de verdelingsconstanten, K_n, die gedefinieerd worden als:

$$K_n = c_{\text{stat},n}/c_{\text{mob},n} \tag{1}$$

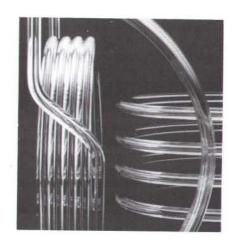
waarbij $c_{stat,n}$ en $c_{mob,n}$ de concentraties van component n in de stationaire resp. de mobiele fase zijn.

In de chromatografie kan de mobiele fase een gas of een vloeistof zijn en de stationaire

Boven: Fig. 2. Recente ontwikkelingen in de vloeistofchromatografie maken het mogelijk benzeen (B) en 5 nauw verwante aromatische koolwaterstoffen binnen 90 sec van elkaar te scheiden. De tussen de meeste pieken aanwezige 'ruimte' laat bovendien duidelijk zien dat een scheiding van 10-12 stoffen binnen de hier genoemde tijd zeker tot de mogelijkheden behoort.

Rechts: In veel gevallen wordt gaschromatografie beschreven in zgn. gepakte glazen kolommen (links), die gevuld zijn met kieselguhr waarop een visceuze vloeistof als stationaire fase gehecht is (lengte 2 m; diameter 2 mm). Voor gecompliceerde analyses gebruikt men in toenemende mate zgn. capillaire 'fused silica' kolommen (rechts), die een lengte van wel 50 m kunnen hebben bij een diameter van 0,2 tot 0,3 mm.

Indeling van de chromatografische technieken.



Gaschromatografie			Vloeistofchromatografie		
Systeem	Afk.	Techniek	Systeem	Afk.	Techniek
Gas-vloeistof	GLC	КС	Vloeistof-vloeistof	LLC	KC, DLC, PC
Gas-vast	GSC	кс	Vloeistof-vast	LSC	KC, DLC
			lonenwisseling	IEC	кс
			Gel-permeatie	GPC	кс

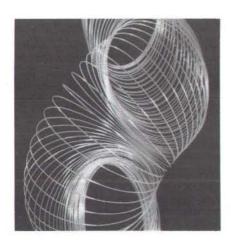
De (Engelstalige) afkortingen zijn een naamgeving volgens de gebruikte fasencombinatie dan wel het mechanisme; KC, DLC en PC: kolom-, dunnelaag- resp. papierchromatografie.

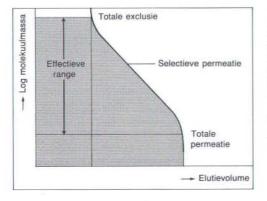
TABEL

fase een *vloeistof* (vastgehouden aan een inerte drager) of een *vaste stof*. Men krijgt zo de in de tabel gegeven indeling, waarbij ook de mogelijke uitvoeringsvormen – dat is, chromatografie in een *kolom* of in een *open bed* (dunne laag of papier) – vermeld zijn.

Zes chromatografische systemen

Bij de gaschromatografie (GC) heeft men vrijwel altijd te maken met gas-vloeistof-chromatografie, net zoals bij het al vermelde voorbeeld uit het werk van Martin en James: de molekulen van de te scheiden verbindingen (de vetzuren) verdelen zich tussen de aan een drager (kieselguhr) gebonden vloeistoffase (de siliconenolie) en het langsstromende gas. Gasvastchromatografie, waarbij de kolom met een geschikt adsorbens gevuld is, wordt slechts incidenteel gebruikt, bijv. voor de analyse van mengsels van gassen.





In de vloeistofchromatografie (LC) zijn er naast de combinaties *vloeistof-vloeistof* en *vloeistof-vast*, waarvan al voorbeelden zijn gegeven, namelijk bij de aminozuren van Martin en Synge en de bladgroenkorrels van Tsvett, nog twee mogelijkheden:

Van *ionenwisseling* spreekt men als bij het verdelingsproces componenten uit de stationaire en mobiele fase ionogene bindingen met elkaar aangaan; met andere woorden, als we te maken hebben met evenwichten als:

$$RSO_3^-H_{stat}^+ + K_{mob}^+ \rightleftharpoons RSO_3^-K_{stat}^+ + H_{mob}^+$$
 (2)

waarbij de sulfonzuurgroepen zijn ingebouwd in een in water onoplosbaar driedimensionaal netwerk (hier met R aangegeven) dat men een ionenwisselaar noemt. Behalve kationenwisselaars (positieve ionen, zoals hier in het voorbeeld) kent men ook anionenwisselaars, waarbij de actieve plaatsen dikwijls quaternaire ammoniumgroepen (-N(CH₃)₃⁺) zijn.

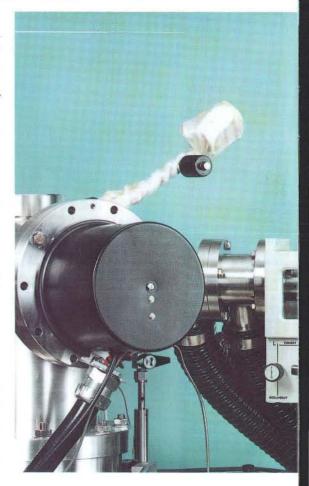
In de gel-permeatiechromatografie wordt gebruik gemaakt van een stationaire fase met een duidelijke poriënstructuur. Scheidingen zijn nu een gevolg van verschillen in afmeting van de onderzochte molekulen. Te grote molekulen kunnen in het geheel niet in de poriën binnendringen en komen onvertraagd door de kolom. Kleinere molekulen dringen door in een gedeelte van de poriën en ondergaan een vertraging die een functie is van hun afmeting. Beneden een bepaalde kritische grootte kunnen molekulen binnendringen in alle poriën. Zij ondergaan de maximaal mogelijke vertraging en vormen te zamen het 'natuurlijke einde' van het chromatogram (zie fig. 3).

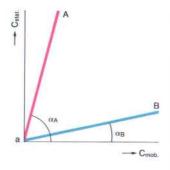
Links: Fig. 3. Een typische ijkcurve uit de gel-permeatiechromatografie. Scheiding is hier een gevolg van verschillen in de afmeting van de molekulen. In een gegeven chromatografisch systeem is het evolutievolume dan ook karakteristiek voor de molekuulmassa van de onderzochte verbinding. Iedere stationaire fase heeft zijn eigen poriënstructuur en kan gebruikt worden voor een bepaald traject van molekuulmassa's, nl. dat waar selectieve permeatie optreedt. Te grote molekulen (totale exclusie) kunnen op deze fase onderling niet van elkaar worden gescheiden en hetzelfde geldt voor te kleine molekulen (totale permeatie). In de handel verkrijgbare PGC-fasen maken het mogelijk molekuulmassa's van ca. 100 tot 1000 000 te bepalen.

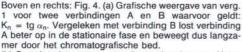
Elutie-analyse

Men kan zich het scheidingsproces als volgt voorstellen. Een klein volume van het te onderzoeken mengsel wordt als een smalle band of zone ingespoten op de top van een kolom of als een vlekje aangebracht op een dunnelaagplaat. Als de mobiele fase langs of door het chromatografische bed (een veel gebruikte verzamelnaam voor kolom, plaat en papier) stroomt, verdelen de componenten van het te onderzoeken mengsel zich ieder op hun eigen wijze tussen stationaire en mobiele fase. Verplaatsing door het bed treedt uiteraard alleen op als de (molekulen van de) componenten zich in de mobiele fase bevinden. Met andere woorden, verschil in K_n-waarden (zie verg. 1) leidt tot een verschil in snelheid cq. verplaatsing en dus in principe tot scheiding (zie fig. 4). De mate van scheiding hangt uiteraard af van de verschillen tussen de diverse Kn-waarden en van de lengte en kwaliteit van het chromatografische bed.

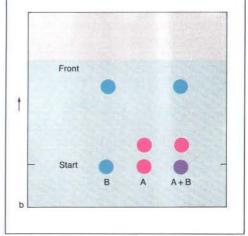
De hier zeer schematisch geschetste techniek is die der elutie-analyse. Bij kolomchromatografie, dat wil zeggen bij alle GC en bij kolom-LC, verlaten de gescheiden componenten tenslotte één voor één de kolom en worden direct aansluitend (on-line) gedetecteerd. De werking van enige in de GC en LC veel gebruikte detectoren zal in het betreffende artikel worden behandeld. Hier is uitsluitend van belang dat detectie altijd berust op een differentiële meting, waardoor een uit de kolom stromende compo-

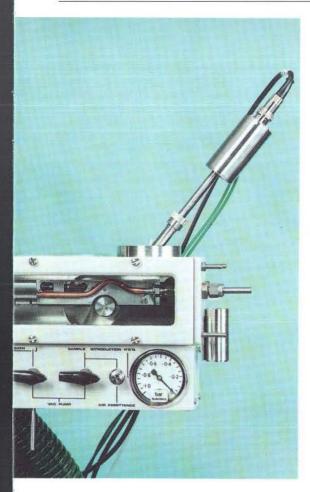


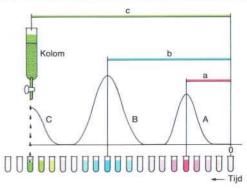




(b) Gestyleerde weergave van het verband tussen K_n en de plaats van de verbindingen A en B in het chromatogram – hier een dunnelaagplaat.







Boven: Fig. 5. Het ontstaan van een chromatogram in een kolomchromatografisch experiment kan het beste worden toegelicht met een plaatje uit de klassieke periode (voor 1970). Na het opbrengen van het te analyseren mengsel op de glazen kolom (K) begint de elutie met een geschikt gekozen oplosmiddelmengsel en voltrekt zich de scheiding. Op de x-as is - van rechts naar links! - uitgezet de tijd die is verlopen sinds het starten (0) van de elutie. De retentietijd $t_{\rm R}$ van de componenten A, B en C bedraagt a, b en c sec. Vangt men de uitstromende vloeistof in kleine, gelijke fracties op dan vindt men een concentratieverloop als aangegeven met behulp van de tint.

Links: Koppeling van HPLC (waarbij een vloeistof uit de kolom stroomt) en massaspectrometrie (waarbij een gas onder lage druk de ionenbron dient binnen te stromen) biedt ongekende mogelijkheden bij tal van analyses, maar de overgang vloeistof/gas onder lage druk maakt het noodzakelijk kostbare interfaces te gebruiken, waarvan er hier een is afgebeeld.

Linksonder: Het automatiseren van een HPLC-analyse maakt een nauwkeuriger instellen van de systeemparameters mogelijk. Dat is zeer belangrijk bij dit systeem, waar de eigenlijke scheiding in de verticaal opgehangen analysekolom wordt voorafgegaan door een vóórscheiding op drie korte voorkolommen (bovenaan de figuur), die daarna met de analysekolom verbonden worden.





nent steeds als een piek zichtbaar wordt. Het totale resultaat van een analyse, d.w.z. het totale piekpatroon, noemt men een *chromatogram*. Het ontstaan van zo'n chromatogram is in enig detail in fig. 5 te zien, terwijl de figuren 2 en 6 voorbeelden van hedendaagse LC- resp. GC-analyse zijn.

Bij dunnelaag- en papierchromatografie wordt de scheiding beëindigd nadat de mobiele fase een zekere afstand op de dunnelaagplaat of papierstrook heeft afgelegd. Men krijgt hier dus een scheiding naar *plaats* en niet, zoals bij de kolomuitvoering, naar *tijd*. Het detecteren van de diverse componenten geschiedt in de regel door besproeien met geschikte reagentia of het waarnemen van de fluorescentie die bepaalde stoffen vertonen, wanneer ze met UV-

licht bestraald worden. Het chromatogram bestaat nu uit een reeks ronde of ellipsvormige vlekjes (zie fig. 7) die overigens ook instrumenteel kunnen worden afgetast en dan weer een piekenpatroon als resultaat geven. Intermezzo I geeft nadere informatie over doel en werkwijze in de dunnelaagchromatografie.

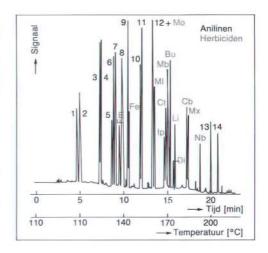
Karakteristieke tijd en plaats

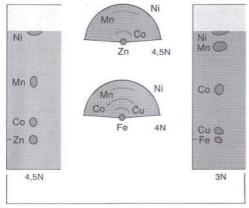
Tenslotte constateren we dat, in een gegeven chromatografisch systeem en bij gelijkblijvende omstandigheden, een bepaalde component wordt gekarakteriseerd door de tijd waarin hij de kolom doorloopt, de *retentietijd* t_R (zie de figuren 2 en 5), dan wel de plaats die hij op de dunnelaagplaat inneemt, de R_f -waarde (zie intermezzo I). Daarbij moet bedacht worden dat

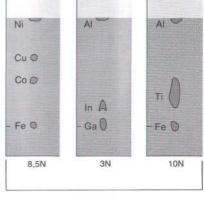
twee componenten binnen de meetfout dezelfde tR of Rf kunnen hebben, d.w.z. niet gescheiden worden. Met andere woorden, men mag uit de afwezigheid van een piek of vlek op een bepaalde plaats in een chromatogram wèl zonder meer afleiden dat een bepaalde component niet aanwezig is, maar uit de aanwezigheid van een piek of vlek kan niet ondubbelzinnig worden afgeleid dat die piek of vlek door slechts één (en dan nog de verwachte!) component wordt veroorzaakt. Dergelijke uitspraken kunnen bij gecompliceerde problemen pas worden gedaan als zeer selectieve detectiemethoden worden toegepast. Het meest bekend is de in een van de volgende artikelen te behandelen combinatie gaschromatografie/ massaspectrometrie (zie ook fig. 8).

Rechts: Fig. 6. Een fraai voorbeeld van een chromatogram verkregen met GC op een 25 m lange, zeer nauwe zgn. capillaire fused-silica-kolom is de hier afgebeelde scheiding van 15 fenylureumherbiciden en de bij (bio)degradatie daaruit ontstane anliinen. In dit geval zijn alle verbindingen eerst omgezet in fluor-bevattende derivaten om de detectie van sporebestanddelen van deze stoffen in milieumonsters mogelijk te maken. De hierbij gebruikte elektroninvangst-detector kan 1 pg (= 10^{-12} g) van iedere verbinding afzonderlijk aantonen.

Rechtsonder: Fig. 7. Kwalitatieve analyse van bijv. ertsen en legeringen kan dikwijls snel geschieden m.b.v. dunnelaagchromatografie. De hier afgebeelde resultaten werden verkregen op silica geïmpregneerd met een zgn. vloeibare anionenwisselaar, terwijl een waterige oplossing van zoutzuur of salpeterzuur als mobiele fase werd gebruikt. Dergelijke scheidingen over een afstand van ca. 3 cm duren niet langer dan 5-10 min.

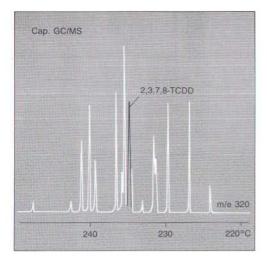






Alamine

Amberlite



Links: Fig. 8. Er is geen verbinding die in het kader van de milieuverontreiniging zo de aandacht trekt als 'dioxine', waaronder men het uiterst giftige 2,3,7,8-tetrachloordibenzdioxine (2,3,7,8-TCDD) verstaat. Er zijn echter 22 TCDDs en zelfs temperatuur-geprogrammeerde GC op een capillaire kolom bewerkt niet meer dan een marginale scheiding tussen 2,3,7,8-TCDD en verscheidene van de 21 isomeren. In zo'n geval is selectieve detectie via massaspectrometrie (hier bij m/e = 320) en/of het opnemen van een volledig massaspectrum voor een nog ondubbelzinniger identificatie een absolute vereiste.

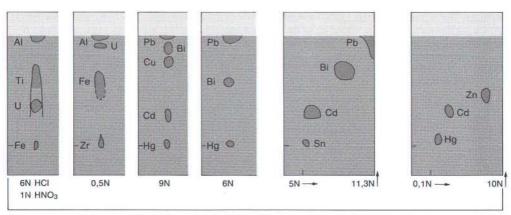
Kwaliteit van de scheiding

Met name bij ingewikkelde mengsels is de kwaliteit van de scheiding van doorslaggevende betekenis: hoe beter de kwaliteit, des te meer componenten met vrijwel gelijke t_R of R_f kunnen er nog van elkaar gescheiden worden. We kunnen hier het volgende beeld gebruiken.

De ingespoten dan wel opgebrachte hoeveelheid monster kan in het ideale geval als een zeer smalle band of zone worden voorgesteld. Tijdens het elutieproces blijft die fraaie vorm helaas niet behouden, omdat:

 er in ieder geval diffusie zal optreden vanuit de zone (concie > 0) naar de omringende mobiele fase (concie = 0); de te scheiden componenten nooit een volledige evenwichtsinstelling kunnen bereiken tussen de stilstaande stationaire en de er langs stromende mobiele fase.

Beide effecten leiden tot een zekere mate van bandverbreding, waardoor de scheiding vager wordt en aan kwaliteit verliest: de oorspronkelijke zone wordt vervormd tot een piek met een klokvormig profiel, een zgn. Gaussepiek (zie fig. 9). Bij het ontwerpen van een efficiënt chromatografisch systeem gaat het er uiteraard om de bandverbreding gering te houden, dat wil zeggen om een chromatogram dat uit scherpe pieken bestaat te produceren (zie fig. 10).



Amberlite

Dunnelaagchromatografie

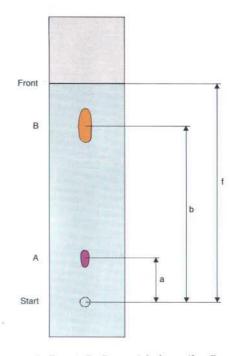
Dunnelaagchromatografie (DLC) is een eenvoudige techniek die tot voor kort vooral voor kwalitatieve analyse werd gebruikt. Recente ontwikkelingen op het gebied van de dunne lagen (meestal cellulose of silica aangebracht op een glasplaat) en van de randapparatuur hebben er toe geleid dat DLC steeds meer wordt toegepast voor kwantitatieve routine-analyse van grote series monsters.

Een experiment begint met het via een capillair aanbrengen van een kleine hoeveelheid (ca. 1 µl) te analyseren oplossing op de dunnelaagplaat. Men laat het vlekje even drogen en brengt de plaat dan in een tank, waarin zich al een oplosmiddel bevindt. Dit eluens (= mobiele fase) stijgt op ten gevolge van de capillaire werking van de stationaire fase; dit effect wordt echter tegengewerkt door de zwaartekracht. Als gevolg daarvan neemt de elutiesnelheid snel af met toenemende stijghoogte en wordt op den duur nul. Het experiment wordt beëindigd lang voor deze situatie is bereikt, omdat bij te langzame elutie de diffusie zodanig gaat overheersen dat de kwaliteit van de scheiding begint te verminderen. In de praktijk is 5 cm een veel gebruikte loopafstand.

De plaats van een verbinding op het na detectie resulterende chromatogram wordt aangegeven met behulp van de *retardatiefactor*, gedefinieerd als

$$R_f = \frac{afstand\ start\ tot\ zwaartepunt\ vlek}{afstand\ start\ tot\ vloeistoffront}$$
 (I-1)

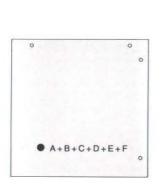
die experimenteel wordt bepaald zoals is aange-

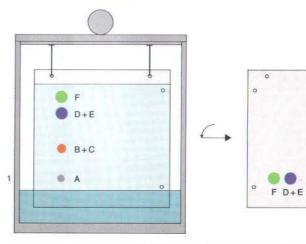


geven in fig. I-1. De R_f van A is dan: a/f en $R_{f,B} = b/f$.

Alternatieve uitvoeringsvormen zijn radiale DLC die dikwijls zeer snelle scheidingen oplevert (zie fig. I-2) en tweedimensionale DLC, die bij de analyse van complexe monsters wordt gebruikt (zie fig. I-3).

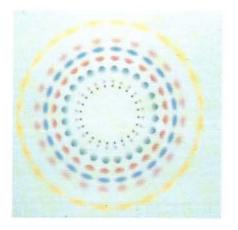
B+C



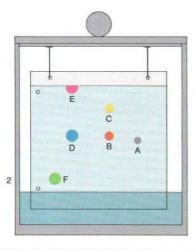


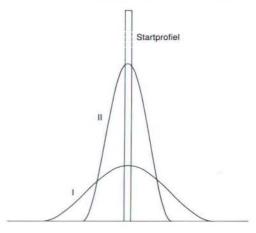
Links: Fig. I-1. R_I -waarden zijn het quotiënt van de door een vlek en door het vloeistoffront afgelegde afstanden, zodat altijd geldt: $0 \leqslant R_f \leqslant 1$. De R_I -waarden van A en B bedragen af resp. b/f.

Onder: Fig. I-2. Bij radiale DLC worden de vlekken in een cirkeltje rondom een centraal punt aangebracht. Het eluens wordt in dit centrale punt via een capillair aangevoerd. De scheiding van een aantal kleurstoffen op silica blijkt een spectaculair resultaat te kunnen geven.



Onder: Fig. I-3. Tweedimensionale DLC wordt uitgevoerd op vierkante dunnelaagplaten. Het te analyseren mengsel dat de componenten A-F bevat, wordt in een hoek aangebracht. Men ontwikkelt eerst met elutiemiddel 1, droogt en ontwikkelt daarna met elutiemiddel 2 in een richting loodrecht op de eerste. Na de tweed behandeling zijn ook de, aanvankelijk ongescheiden, stoffen B, C en D, E gescheiden.





Boven: Fig. 9. Diffusie en onvolkomen evenwichtsinstelling veroorzaken een symmetrische verbreding van de als een smalle band of zone opgebrachte hoeveelheid monster. Er ontstaat steeds een klokvormig profiel, maar het zal duidelijk zijn dat geringere bandverbreding synoniem is met efficiëntere chromatografie; met andere woorden: situatie II geniet de voorkeur boven situatie I.

Het voert hier te ver om de afhankelijkheid van de efficiëntie van de diverse systeemparameters gedetailleerd te bespreken. We volstaan er mee de belangrijkste parameters te vermelden:

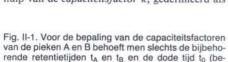
- de deeltjesgrootte van het dragermateriaal of adsorbens in de kolom of op de dunnelaagplaat. Een geringere deeltjesgrootte geniet de voorkeur aangezien deze alle afstanden die de molekulen van de te scheiden verbindingen moeten overbruggen verkleint en dus tot snellere evenwichtsinstelling leidt;
- de snelheid van de mobiele fase: hier moet een compromis worden gezocht tussen niet te lage snelheden (te veel last van diffusie) en niet te hoge snelheden (te weinig kans op goede evenwichtsinstelling), waarbij het compromis zo veel mogelijk naar hogere snelheden toe gezocht wordt omdat dit een kortere analysetijd betekent;
- de temperatuur van het systeem: een verandering in temperatuur beïnvloedt in ieder geval zowel de diffusie als de evenwichtsinstelling; een hogere temperatuur betekent meer diffusie (ongunstig) maar snellere evenwichtsinstelling (gunstig); aangezien ook de K_n-waarden temperatuurafhankelijk zijn, kan men slechts vaststellen dat een temperatuuroptimalisatie zorgvuldig moet geschieden.

De capaciteitsfactor

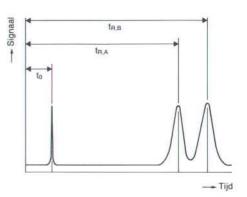
De retentietijd van een verbinding kan geschreven worden als de som van de tijden doorgebracht in de stationaire en de mobiele fase:

$$t_{R} = t_{s} + t_{m} \tag{II-1}$$

De tijd doorgebracht in de mobiele fase is voor iedere verbinding dezelfde. Zij is gelijk aan de tijd nodig om een stof die geen interactie heeft met de stationaire fase, van het begin naar het einde van de kolom te transporteren, de zgn. dode tijd t₀. In wezen is t_s dus de voor iedere verbinding karakteristieke grootheid. Met behulp van de *capaciteitsfactor* k, gedefinieerd als



paald met een zgn. onvertraagde component) op te



meten. Let er op dat men in feite in plaats van echte tijdmetingen eenvoudig lengtemetingen op het chromatogram uitvoert! Dat is in de praktijk uiteraard veel eenvoudiger.

Schotelhoogte en schotelgetal

Ook zonder verdere achtergrondkennis kan men de efficiëntie van een systeem overigens op eenvoudige wijze kwantitatief bepalen. Er is eerder al geconstateerd dat het profiel van chromatografische pieken onder gunstige omstandigheden klokvormig is. Een dergelijk profiel (zie fig. 11) heeft buigpunten bij h_{max}/\sqrt{e} , waarbij h_{max} de maximale piekhoogte is en e het grondtal van de natuurlijke logaritme voorstelt. Met e=2,7183 leidt dit tot

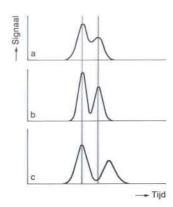
$$h_{max}/\sqrt{e} = 0,60 h_{max}$$
 (3)

De halve bandbreedte op deze hoogte noemt men de *standaarddeviatie o* van de piek. De efficiëntie van een uniform en homogeen chromatografisch bed wordt nu opgegeven als de *schotelhoogte* H, die gelijk is aan het quotiënt van de variantie (in lengte-eenheden), σ_1^2 , en de lengte L van het doorlopen chromatografische bed; in formule:

$$H = \sigma_1^2/L \tag{4}$$

Het bepalen van schotelhoogten vindt vrijwel uitsluitend plaats in de kolomchromatografie, Onder: Fig. 10. De kwaliteit van de scheiding tussen twee naburige pieken in een chromatogram wordt niet alleen bepaald door het verschil in retentietijd, maar ook door de breedte van die pieken. Anders gezegd, een niet geheel gelukte scheiding (a) kan geoptimaliseerd worden door de kolomkwaliteit te verbeteren (σ_1 en σ_2 kleiner; b) of door de selectiviteit te vergroten (σ_1 en σ_2 kleiner; b) of door de selectiviteit te vergroten (σ_1 en σ_2 kleiner; b) of door de selectiviteit te vergroten (σ_1 en σ_2).

Rechts: Fig. 11. De efficiëntie van een chromatografische kolom kan eenvoudig worden weergegeven via het schotelgetal N. De voor de berekening van N benodigde gegevens zijn direct uit een opgetekende piek (plaats: t_R; breedte: ot) af te lezen.



 $k = t_s/t_m$ of wel $k = t_s/t_o$ schrijft men nu:

$$t_R = t_0 (1+k)$$
 (II-2)

Zoals in fig. II-1 wordt gedemonstreerd kan k zeer eenvoudig aan de hand van een chromatogram worden bepaald.

Men kan aantonen dat de snel te bepalen capaciteitsfactoren recht evenredig zijn met de veel fundamenteler, maar minder voor meting toegankelijke evenwichtsconstanten K_n (zie verg. 1). Dit verklaart de populariteit van k-waarden, die in welhaast ieder artikel over chromatografie gebruikt worden.

 h_{max} $N = (t_B/\sigma_t)^2$ h_{max}/\sqrt{e}

waar men liever in tijds- dan in lengte-eenheden meet. Na enig omrekenen vindt men:

$$H = L(\sigma_t/t_R)^2 \tag{5}$$

waarbij t_R de al eerder geïntroduceerde retentietijd van de beschouwde piek is en σ_t de standaarddeviatie ervan, nu uitgedrukt in tijdseenheden. Vergelijking 5 wordt dikwijls herschreven als:

$$N = (t_R/\sigma_t)^2 \tag{6}$$

waarbij N = L/H het schotelgetal van de kolom genoemd wordt. De berekening van N uit een in een chromatogram geregistreerde piek wordt in fig. 11 gedemonstreerd.

Samenvatting

Het voorgaande heeft laten zien dat de chromatografie, na een aarzelend begin, via de gaschromatografie en de kolomyloeistofchromatografie tot grote bloei is gekomen. Voor een adequaat appreciëren, en, in veel gevallen, zelfs voor het praktisch beoefenen, van deze technieken is in eerste instantie slechts een bescheiden hoeveelheid theoretische kennis nodig. Wie weet hoe een chromatografische piek informatie kan verschaffen over analysetijd (t_R van de laatst eluerende piek), kwaliteit van de kolom (N of H; via t_R en σ_t) en de scheiding Rs; via t_R en o_t) en wie capaciteitsfactoren (zie intermezzo II) op hun waarde weet te schatten, is voldoende toegerust om de volgende afleveringen in deze serie met vrucht en, naar ik hoop, met plezier te bestuderen.

Literatuur

Miller, J.M., (1975). Separation Methods in Chemical Analysis. Wiley, New York.

Karger, B.L., Snyder, L.R., Horvath, C., (1974). An Introduction to Separation Science. Wiley, New York.

Deelder, R.S., Konings, J., (1981). Chromatografie. TH Eindhoven.

Götz, W., Sacks, A., Wimmer, H., (1978). Dünnschichtchromatografie. Fischer Verlag, Stuttgart.

Fried, B., Sherma, J., (1982). Thin-layer Chromatography, Techniques and Applications. M. Dekker Inc., New York.

Deelder, R.S., Tommassen, P.H., Berg, J.H.M. van den, (1985). Chromatografie. Heron, Amsterdam. ISBN 90 100567 59 Poole, C.F., Schwette, S.A., (1984). Contemporary practice of chromatography. Elsevier, Amsterdam.

Bronvermelding illustraties

J.A.B. Verduijn, Natuur en Techniek, Maastricht: pag. 748-749, 757.

E. Merck Nederland BV, Amsterdam: pag. 753 rechtsonder. Supelchem, Hilversum: pag. 754, 755. VG Instruments, Wezep: pag. 756-757.

Bij de samenstelling van dit artikel hebben wij de medewerking gehad van drs. J. Bouma, Chemiedidactiek VU Amsterdam. De auteur van dit artikel verleent ook zijn medewerking bij de andere artikelen in de serie over chemische analysemethoden.

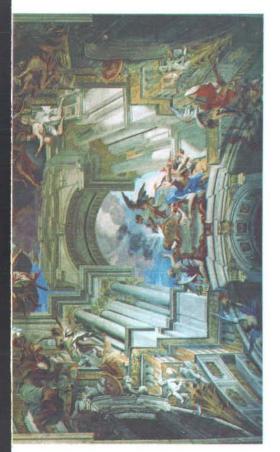
M.C. Colenbrander 's-Hertogenbosch'

BEELD EN



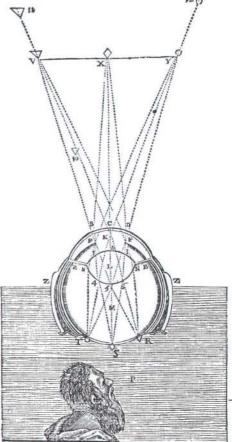
De Franse filosoof René Descartes beschreef in het begin van de 17e eeuw hoe de beeldvorming in het oog getoond kan worden. Door van het oog van een os de lagen achter de retina af te schrapen, kan men de projectie van het beeld op de retina zien. Dat er bij visuele waarneming meer komt kijken dan alleen beeldvorming op de retina bewees o.a. de Italiaan Fra Andrea Pozzo. Op het plafond van de St. Ignatiuskerk in Rome schilderde hij deze allegorie. Bij het bekijken raakt men in verwarring over welke elementen nog bij het kerkgebouw horen en welke geschilderd zijn.

VERBEELDING



Zien is voor ieder die kan zien een vanzelfsprekendheid. Het proces, dat begint als licht op het oog valt, eindigt in de hersenen, waar de impulsen uit de oogzenuwen verwerkt worden tot het beeld dat wij ervaren.

Daarbij treden nog veel merkwaardige verschijnselen aan het licht. Zo bestaan er mechanismen die prikkels als het ware selecteren, alvorens ze tot ons bewustzijn worden toegelaten.



De ruinte om ons neen

Ons tastgevoel en onze gezichtsindrukken geven ons de meest betrouwbare informatie over de ruimte om ons heen. We voelen en we zien de dingen in de ruimte. De ruimte zelf is een abstractie; we ervaren de ruimte alleen aan

de dingen die zich erin bevinden.

Tastruimte en gezichtsruimte komen grotendeels met elkaar overeen: we voelen de dingen zoals we ze zien. Toch zijn beide ruimtes niet geheel identiek. Onze ogen benaderen de ruimte heel anders dan onze tastende handen. Tastend kunnen we slechts weinig dingen tegelijk waarnemen, we voelen de details het een na het ander. Alle drie dimensies kunnen even goed gevoeld worden en we voelen de achterkant van een voorwerp even nauwkeurig als de voorkant. We kunnen alles voelen wat binnen tastbereik is en niets van hetgeen daarbuiten ligt. Tastend kunnen we voorwerpen echter veel slechter herkennen dan ziend.

Bij het zien overzien we veel in één blik. Verhoudingen komen daarom beter tot hun recht. Maar we zien niets van de achterkant van de dingen en hoe verder een voorwerp van ons verwijderd is, des te minder kunnen we ervan onderscheiden. Maar de gezichtsruimte is evenmin zonder fouten. Wanneer we een hand opzij achter ons hoofd houden en langzaam naar voren brengen, terwijl we onze vingers bewegen, zien we de vingers wanneer ze de gezichtsveldgrens passeren; dat is 100° opzij dus nog iets in de ruimte achter ons. We hebben echter de indruk dat onze vingers dan al verder naar voren zijn. Naar opzij zien we dus de ruimte als het ware naar voren verschoven en daarom versmald. Daarom zien we ook een plaat aan de muur, wanneer we 30 à 40 graden ernaast kijken, smaller dan hij is. De bovenen onderzijde schijnen dienovereenkomstig schuin te lopen.

Richten we onze blik boven de plaat, dan lijkt de verticale afmeting afgenomen te zijn.

Het gesprek met de man in de bol

De tastruimte en de optische ruimte hebben beide hun eigenaardigheden, hun eigen wetten. Ze verhouden zich als twee talen die we beide zeer goed kennen. Onophoudelijk zijn we bezig de waarnemingen van de tastruimte te vertalen in gegevens voor de optische ruimte en omgekeerd.

Dit brengt de vraag naar voren: zijn het twee aspecten van een zelfde ruimte, of zijn we in de grond verschillend. Leven blindgeborenen in dezelfde ruimte als wij? Dat vraagstuk is volgens mij onoplosbaar en deze mening wil ik trachten duidelijk te maken door een verhaal. Het verhaal sluit aan bij een wiskundige bewerking, die men conversie noemt. Als men om een middelpunt M een cirkel trekt met een straal r, kan men voor elk punt A buiten de cirkel een punt A' op de lijn AM binnen de cirkel aanwijzen, dat voldoet aan de evenredigheid AM: r = r: A'M. Dit betekent o.a. dat het oneindige in elke richting

In zijn prent 'Man met de spiegelende bol' toont M.C. Escher fraai de hier beschreven eigenschappen van de optische ruimte en de tastruimte.

INTERMEZZO



Boven: Fig. 1. De verschillen in waarneming tussen beide ogen kunnen eenvoudig gedemonstreerd worden met deze proef. Sluit men het linker oog, dan zal het rechteroog het kleine vierkantje links van het midden van het grote waarnemen. Sluit men het rechteroog, dan ziet men het omgekeerde. Zijn beide ogen geopend, dan worden beide beelden gefuseerd en ziet men één vierkantje recht voor het grote.

Kijken we onder de plaat, dan lijkt daarentegen de verticale afmeting toegenomen. Onze optische ruimte is dus verre van egaal. Blijkbaar werkt de zwaartekracht ons gevoel van afstand tegen. Als we staan voelen we onze voeten dichterbij dan wanneer we liggen. Als we op onze zij liggen voelen we onze schouders en onze heupen dichter bij elkaar dan wanneer we op onze rug liggen.

Zien met twee ogen

We nemen de ruimte om ons heen normaal gesproken met twee ogen waar. Vanuit beide ogen gaan ongeveer gelijke prikkels naar de hersenen toe. Een van de belangrijkste dingen die met de zenuwimpulsen gebeuren, is de samensmelting (fusie) tot iets dat tot een enkelvoudige waarneming aanleiding geeft. We zien met twee ogen één buitenwereld. Wat in één richting wordt gezien door beide ogen wordt tot één waarnemingsbeeld. Alle zenuwvezels

wordt afgebeeld in het punt M, hetgeen voor de oplossing van een aantal vraagstukken, waarbij het oneindige een rol speelt, van belang is.

Conversiebeelden hebben veel eigenaardigheden gemeen met de spiegelbeelden in een bol. Luister daarom naar het gesprek dat ik voerde met het mannetje dat ik zag in de bol.

"Goede morgen", zei ik, terwijl ik naderbij kwam. "Goede morgen", antwoordde hij onmiddellijk, terwijl hij ook wat naar mij toe kwam.

"Mooi weer voor een lange wandeling", zei ik. "Mooi weer voor een lange wandeling", zei hij. Ik stond verbaasd.

"Maar jij hebt niet veel plaats voor een lange wandeling", zei ik. "Maar jij hebt niet veel plaats voor een lange wandeling", zei hij. Dat was te veel voor me.

"Wat nu", riep ik uit, "ik kan gaan waar ik wil en jij bent opgesloten in een bol". Hij zei hetzelfde.

"Ik zal het je bewijzen", riep ik uit, nu werkelijk boos, "ik kan om je heen lopen en dat kan jij niet!" Maar hij, even boos, riep hetzelfde. "Maar luister dan toch", zei ik ten einde raad, "de oppervlakte van de bol is een gesloten oppervlak, ik ben erbuiten en jij bent erbinnen." Maar hij beweerde precies hetzelfde.

"Maar ik kan het je bewijzen", zuchtte ik, verbluft over zoveel onbenul. "Neem een touw en houd het strak tussen beide handen als een rechte lijn tegen de bol aan. Dan zul je zien dat de bol bol is voor mij en dus hol is voor jou." We deden het beide en kwamen beide... tot dezelfde conclusie.

"Maar ik zie toch mijn touw recht en jouw touw krom", zei ik verbijsterd. Ook hij was zichtbaar verwonderd.

"Maar als dat waar is, dan hebben wij beiden hetzelfde recht om de wereld van de ander krom en beperkt te noemen, jij even goed als ik. En misschien is dan de hele wereld, zoals ik die zie, van een ander standpunt beschouwd, niets meer dan de gouden, bolvormige rijksappel in de hand van God."

Hij beaamde voor de zoveelste keer wat ik zei en wij gingen, in gedachten verzonken, ieder onze weg.

Leren zien

Von Senden (1932) heeft in een boek alle bekende gevallen samengebracht van blinden die op latere leeftijd geopereerd zijn en ziende zijn geworden.

Hoe leert nu zo'n blinde zien? Men kan daarbij, geschematiseerd, verschillende stadia onderscheiden.

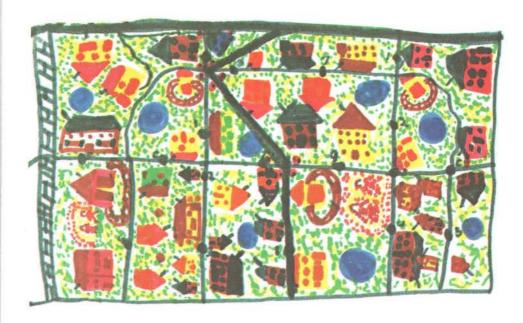
Het eerste stadium is dat van de zuivere gewaarwording. Ze hebben gezichtsindrukken, maar deze indrukken missen elke betekenis. Het is als het horen van een vreemde taal: men hoort alles maar verstaat niets. Merkwaardig is dat bewegingen wel gezien worden maar niet als zodanig worden herkend. Dat komt omdat elke lokalisatie nog ontbreekt.

In het tweede stadium worden de kleuren herkend. Een voorwerp waarvan gisteren geleerd werd dat het geel was, wordt vandaag geel genoemd. Voorwerpen worden herkend aan de kleur. Maar nog niet aan de vorm. Een appel wordt verwisseld met een lucifersdoosje, want beide zijn geel en rood. Een lucifersdoosje op een bruine tafel heeft nog niet voldoende gemeen met hetzelfde lucifersdoosje op een witte tafel om herkend te worden, want object en achtergrond worden nog niet van elkaar onderscheiden. Vormen worden nog niet gezien. Hoekig wordt nog niet van rond onderscheiden.

In het derde stadium wordt geleerd eerst met het hoofd, later met de ogen alleen, de omtrek van een voorwerp te volgen. Op deze wijze worden aan de eigen bewegingen van het hoofd hoeken herkend en kan aan een hoekige figuur het aantal hoeken geteld worden. Het is een tasten met de ogen. Het aantal hoeken wordt nog niet in één oogopslag overzien zoals wij doen wanneer we bijvoorbeeld een boek of iets anders rechthoekig herkennen. De hoeken worden één voor één bekeken.

In het vierde stadium worden voorwerpen herkend omdat ze passen in een bepaald schema. De schema's zijn voorlopig nog zeer onvolledig.

Getaz vertelt van een meisje, Joan, van 18 jaar. Toen Joan haar ogen leerde gebruiken, merkte ze dat bijna niets eruit zag, zoals ze zich voorgesteld had op grond van haar tastvermogen. Ze was onthutst door de ontdekking dat alle mensen die haar bezochten, volkomen verschillende gezichten hadden. Ze had gedacht dat alle gezichten op elkaar leken, behalve dat het ene gezicht wat ronder was dan het andere. Joan had de takken van bomen en de armen van haar



ouders bevoeld en aangenomen dat beide ongeveer hetzelfde waren. Beide ontspringen uit iets ronds en verticaals, alleen takken eindigen in bladeren en armen in vingers. Een van de belangrijkste nieuwe feiten die ze aan een blinde vriendin meedeelde, was dat mensen en bomen in het geheel niet op elkaar lijken.

Een achtjarig patiëntje kende na drie weken haar eerste prentenboek helemaal. Toen kreeg ze een ander prentenboek dat dezelfde dieren bevatte, alleen in wat andere kleur, houding en omgeving. Nu herkende ze niets meer. Maar op de ezel wees ze vol trots en zei: "Dat is een konijntje". Ten slotte zei ze huilend: "Dit is geen mooi prentenboek".

Een ander voorbeeld is dat van een jongen die tot de ontdekking kwam dat alles wat prikt vierkant is. Dus ook spuitwater is vierkant, want het prikt op de tong. Toen hij een houten paard te zien kreeg, zei hij eerst: "Dat is wit, zwart, groen en rood." Na enige aarzeling zei hij: "Het is een paard." Hij wees op de kop, zag de manen en zei: "Dat is de staart". En toen hij de staart zag zei hij: "Dat zijn de leidsels". Toen hij de staart mocht bevoelen, riep hij uit: "Maar dit paard heeft twee staarten!"

Zelfs de eigen hand wordt aanvankelijk niet herkend. Misschien lijkt dat ongelofelijk, want wat is dan tasten voor hen geweest? Toch is het niet onbegrijpelijk. Als we autorijden, bedienen we drie pedalen, een stuur en een versnellingspook. Veel mensen hebben niet de flauwste voorstelling, als ze de motorkap opslaan, waar ze die dingen bij de motor moeten zoeken, maar met hun rijvaardigheid heeft dat niets te maken.

Het laatst wordt het perspectief veroverd. Zo wordt aanvankelijk bij een foto van een man op de voorgrond en een huis op de achtergrond niet begrepen, hoe die grote man in dat kleine huis kan passen. Want voor de tastruimte bestaat geen verschil in grootte voor veraf en dichtbij.

Links: Blinden die op latere leeftijd kunnen zien moeten dit van voren af aan leren. Een van de laatste dingen die men daarbij leert is het zien van perspectief. Ook normaal ziende kinderen moeten die vaardigheid leren. Dat die niet meteen aanwezig is, blijkt o.a. uit het ontbreken van perspectief in kindertekeningen.



Boven: De mate waarin een dier diepte kan zien kan worden getest door het dier op een glazen plaat te zetten, waaronder dit blokkenpatroon geschilderd is. Bekeken werd hoe ze in die situatie reageren. De meeste liepen weg langs de 'ondiepe' zijde van de plaat.

uit het ene oog zoeken daartoe hun partners uit het andere oog op om samen naar de achterhoofdshersenen te gaan.

In de fusie van beide beelden spelen de beide ogen geen gelijke rol. Eén oog neemt de leiding. Evenals men rechtshandige en linkshandige mensen heeft, kent men ook mensen bij wie het rechteroog en mensen bij wie het linkeroog domineert.

Wanneer je een voorwerp in de kamer aanwijst, zal je merken dat de top van je vinger het voorwerp alleen maar bedekt voor één oog, namelijk voor het dominerende oog. Je vinger en het voorwerp worden door het dominerende oog in één richting gezien, maar niet door het andere oog. Het lukt je slechts met moeite zo te wijzen, dat je wijzende vinger het voorwerp voor je andere oog bedekt. Als het je lukt, heb je het gevoel niet goed te wijzen; zo heerszuchtig is het dominerende oog.

Maar zodra je het dominerende oog uitschakelt door het te sluiten, merk je meteen dat je



verkeerd gewezen hebt en lukt het aanwijzen met het andere oog zonder enige moeite. Dat oog kan dus best lokaliseren, maar het ziet ervan af, als het andere in functie is. Dan stelt het zich vrijwillig onder de leiding van zijn partner.

De koning houdt audiëntie

Men kan het beste over dominantie spreken in een beeld, waarbij men de ogen als individuen opvat, die menselijke eigenschappen bezitten. Ons bewustzijn is als een koning die audiëntie houdt voor zijn onderdanen. Deze onderdanen zijn voorstellingen, gedachten en waarnemingen die in een bonte mengeling in de voorzalen wachten om binnengeroepen te worden om hun boodschap te vertellen. In allen leeft het verlangen om binnengelaten te worden en de aandacht van de koning te vragen. Sommigen duwen anderen opzij en dringen naar voren; enkele vermetelen dringen

zelfs door de deur van de zaal des konings, ontzien zich niet anderen buiten de deur te zetten, komen naar voren en beginnen ongevraagd hun relaas, er niet op lettend wie aan het woord was.

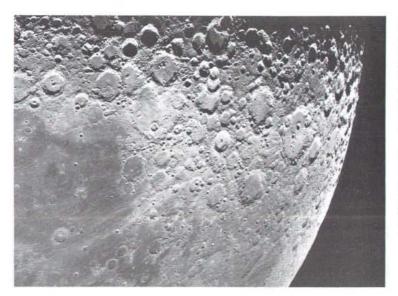
Aan de zaaldeur staan zaalwachters met in de hand een zwarte lijst van degenen die op bevel des konings geweerd moeten worden. Dat zijn onze verdrongen gedachten. Dikwijls weet de koning niet eens waarom deze gedachten op de zwarte lijst gekomen zijn, maar nochtans worden zij niet van de lijst afgevoerd, want de zaalwachters, wier taak het is de koning voor onaangename ontmoetingen te behoeden, hebben een grote mate van zelfstandigheid.

Wanneer de ogen op audiëntie zijn, doet het dominerend oog het woord. Het andere oog beaamt wat het eerste oog gezegd heeft en geeft hier en daar een aanvulling, maar hoedt zich ervoor het dominerende oog tegen te spreken. Dat kan zo ver gaan, dat wanneer het dominerende oog, bijvoorbeeld door een verkeerd brilleglas, domme fouten maakt, het andere oog het niet waagt de fouten te verbeteren. Hun verhouding is als die tussen een deftige lord en zijn intelligente butler. De butler blijft met een uitgestreken gezicht zwijgzaam toezien en doet niet eerder zijn mond open dan nadat de koning de lord verzocht heeft de kamer te verlaten, met andere woorden wanneer het dominerende oog gesloten wordt. Dan pas durft de butler vrijuit te spreken: "Ik merkte wel dat mylord weer onzin praatte, maar u begrijpt wel: in mijn positie kan ik dat niet laten merken". Maar zodra de lord weer aanwezig is, herneemt hij zijn ondergeschikte positie.

Nu is gelukkig in de meeste gevallen het dominerende oog niet zo heerszuchtig dat het altijd alleen aan het woord wil zijn. Dikwijls ligt tussen het gedeelte dat we met twee ogen en het gedeelte dat we met één oog zien.

Twee beelden op één plaats komen nergens voor. Toch moet men hieruit niet opmaken dat het beeld van het niet-dominante oog nu geen rol meer speelt, integendeel, juist de kleine nuances in het relaas van de twee 'oog'getuigen geven de koning een 'dieper' inzicht in de situatie.

Ondanks alle factoren die meehelpen om een goede diepte-indruk te krijgen, beoordelen we de diepte toch verkeerd. Slechts binnen een gebied van twee meter vergissen we ons niet in de afstand. Naarmate de afstand groter wordt, onderschatten we die steeds meer. De verte lijkt altijd dichterbij dan hij in werkelijkheid is. Als we vlak bij een overweg staande een



Geheel links: De grootte van een voorwerp nemen we waar in verhouding tot andere bekende voorwerpen. In de film 'Brats' speelden Laurel en Hardy hun eigen kinderen. Door daarvoor een heel groot decor te laten bouwen wekten ze inderdaad de indruk nog heel klein te zijn.

Links: Onze interpretatie van een beeld blijkt bijvoorbeeld ook afhankelijk te zijn van de plaats van schaduwen. Als men deze foto van de maan ondersteboven houdt, blijken de 'heuvels' in werkelijkheid kraters te zijn.

draagt het beleefd de leiding over aan het andere oog, wanneer dat beter in staat is te vertellen wat er te zien is. Het is alsof het ene oog tegen het andere zegt: "Gaat u voor". Dat gebeurt bijvoorbeeld, wanneer we uit het raam kijken. We zien het grootste gedeelte van de huizenrij aan de overkant met twee ogen, maar naar weerskanten zien we een deel met één oog. We kunnen echter, tenzij de ogen ongelijk van sterkte zijn of tenzij we voor een ogenblik één oog sluiten, niet zien waar de grens

trein op ons af zien komen, onderschatten we zijn snelheid sterk, totdat hij ineens met een ongedachte vaart voorbij schiet. Het silhouet van een stad die we goed kennen verrast ons steeds weer door het grote verschil dat we zien tussen dwarse afstanden en afstanden in diepte. Aan het strand zien we de zwakke bocht van de kustlijn zo overdreven dat het is alsof we aan een baai staan. Een bocht in de weg lijkt in de verte altijd een bijna rechthoekige knik en als we die bocht op de kaart opzoeken



verwondert het ons dat de richtingsverandering zoveel kleiner is dan we dachten. Een helling van de weg waar we tegenaan kijken lijkt in de verte steiler dan hij in werkelijkheid is. Vlakbij de top van de heuvel zijn we geneigd te vroeg het einde van de stijging aan te nemen, omdat we bovendien geneigd zijn het verste gedeelte van de weg dat we kunnen zien ten onrechte met de horizon te vereenzelvigen.

De wekfunctie

De veranderingen die de prikkel ondergaat, blijven niet beperkt tot de retina.

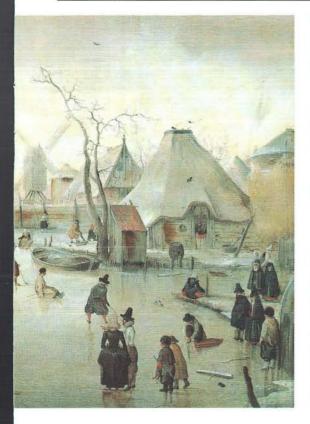
Elke optische prikkel heeft niet alleen een functie bij de waarneming, maar ook een algemene wekfunctie. Deze is in een ander deel van de hersenen gevestigd dan de waarnemingsfunctie.

In ons gezichtsveld trekt niet alles even sterk de aandacht. Afgezien van het feit dat bewegingen onze aandacht vragen, omdat alle andere prikkels door nivellering wegvallen, zijn er drie typen prikkels die in het bijzonder onze aandacht opeisen. Het zijn: sterk contrast, hoge helderheid en de kleur rood.

Op een effen muur wordt onze blik vanzelf getrokken naar de platen aan de wand, zowel wanneer deze donkerder zijn, dan wanneer deze lichter zijn dan de omgeving. Het is de *contrastrijkdom* die hier onze aandacht vraagt. En wat verlichting betreft: niets is zo doods als een al te gelijkmatige, schaduwloze verlichting.

Lichte vlakken trekken meer de aandacht dan donkere vlakken. We staren graag uit het raam. Tijdens een toneelvoorstelling dooft men het licht in de zaal, niet zozeer om de zichtbaarheid te vergroten, want die neemt daardoor niet noemenswaard toe, maar om de concentratie van de aandacht op het toneel te verhogen.

Onder de kleuren trekt *rood* de meeste aandacht. Van de Belgische en Nederlandse vlag



bewustzijn vindt de weg in deze veelheid van gegevens door deze te ordenen, dat wil zeggen bij elkaar te nemen wat naar ons besef bij elkaar hoort. Het merkwaardige is nu dat eigenlijk alleen het eindresultaat van deze ordening tot ons bewustzijn doordringt en dat we de grootste moeite hebben om de elementaire gegevens waaruit de bewustzijnsinhoud is gebouwd, ieder afzonderlijk tot ons bewustzijn te laten doordringen. Het ordenen zit ons zo 'in het bloed', dat het geheel ons eerder aanspreekt dan de delen waaruit het geheel is opgebouwd.

Het orde scheppen in de chaos gebeurt in drie etappes.

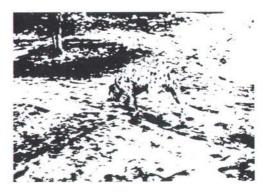
In de eerste plaats worden kleine verschillen naar de achtergrond geschoven, vervlakt. Door deze vervlakking ontstaan in onze waarneming vlakken van gelijke helderheid en kleur. Het is de algemene neiging tot generaliseren die ook hier werkzaam is. Je weet uit ervaring dat het behangselpapier in de kamer aan alle wanden gelijk is; daarom zie je het ook als gelijk en negeer je de verschillen in verlichting wanneer deze vloeiend zijn. Maar op een foto zie je de verschillen in verlichting heel duidelijk, omdat een foto meestal een verkleind beeld van de werkelijkheid geeft, waar-

valt het rood het meest op, hoewel het donkere blauw van de Nederlandse het grootste helderheidscontrast heeft tegen de lucht en het wit de grootste helderheid heeft. Hier en daar een rode toets in de kamer verlevendigt het geheel. In een schilderij van Avercamp vallen de rode kledingstukken het meest op.

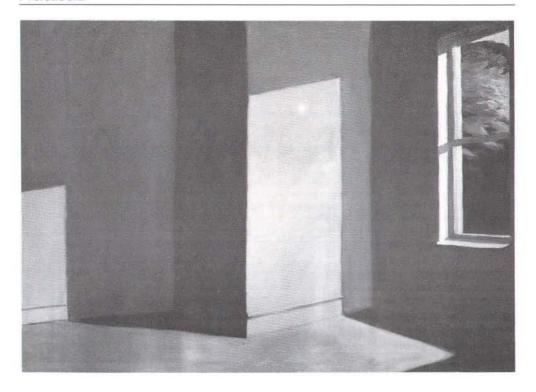
Dat rood zo sterk onze aandacht trekt, hangt ongetwijfeld samen met de grote betekenis die het zien van bloed in het dierenrijk heeft. Ook op dit niveau worden dus de objectieve gegevens veranderd. Als sommige gegevens op de voorgrond worden geschoven, raken andere gegevens op de achtergrond.

De ordenende functie

Het beeld dat op het netvlies valt, wordt door de zintuigcellen geanalyseerd tot een kleurenmozaïek, waarvan de gegevens door een miljoen zenuwvezels voor elk oog ook naar de hersenen worden overgebracht. Ons



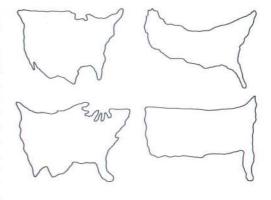
Linksboven: Hendrick Avercamp (1585-1634) is beroemd geworden door zijn winterlandschappen, zoals dit 'IJsvermaak'. Let op hoe hij gebruik maakt van de kleur rood om bepaalde figuren te accentueren. Boven: Bij het ordenen van visuele prikkels in de hersenen worden onder andere kleuren naar de achtergrond gedrongen. Zelfs in dit patroon van ogenschijnlijk willekeurige zwarte vlekken is nog een beeld te herkennen.



door de uitersten op het plaatje zo dicht bij elkaar komen, dat hun verschil wel moet opvallen.

Zo is het ook met kleuren. Een voorwerp waarvan je weet dat het één kleur heeft, wil je ook in één kleur blijven zien. Daarom verdragen lamplicht en daglicht elkaar niet. Elk voorwerp dat gedeeltelijk door daglicht en gedeeltelijk door lamplicht wordt beschenen krijgt twee kleuren. Dat strijdt tegen onze tendentie om te generaliseren en we zeggen dan dat de kleuren vloeken. Analoog aan vloekende kleuren is de valse noot in de muziek, waarbij men ook het dilemma van een verschil dat te klein is voor een interval en te groot om te negeren, als onaangenaam ervaart.

In de tweede plaats vindt ordening plaats door de kleuren naar de achtergrond te schuiven. Op een zwart-witfoto herkennen we zonder de minste moeite de afgebeelde voorwerpen. De helderheid ervaren we blijkbaar als belangrijker dan de kleur, hoewel in de natuur alles gekleurd is en als gevolg van de verlichting de helderheid dikwijls meer varieert dan de kleur.



Maar ook helderheid zelf wordt ten slotte op de achtergrond geschoven. Belangrijk blijven slechts de begrenzingen van de vlakken. Een lijntekening aanvaarden we als een getrouwe afbeelding van de werkelijkheid. Toch heeft een lijntekening niets met de werkelijkheid gemeen. Hier scheiden zwarte lijnen die er in werkelijk niet zijn, effen vlakken die in werkelijkheid niet effen zijn. Links: In dit schilderij van Edward Hopper: 'Zon in een lege kamer', zien we dat de kleur van alle muren gelijk is, ondanks de zichtbare verschillen in helderheid. Ook dit is een vorm van ordening.

Linksonder: Fig. 2. Voor de meeste Amerikanen zal een kaart van hun land een vertrouwd beeld zijn. Toen men echter vier willekeurige Amerikanen vroeg een kaart uit het hoofd te tekenen, leverde dat vier verschillende kaarten op, waarvan sommige aardig naast de werkelijkheid zaten.

Onder: Fig. 3. Een lijntekening beschouwen we als een getrouwe afbeelding van de werkelijkheid, ondanks het feit dat de tekening niet exact alle details van de hand laat zien.





Dat we in de lijntekening de werkelijkheid toch herkennen, komt omdat we de werkelijkheid interpreteren volgens de principes van de lijntekening.

Onze driedimensionale ruimte

Nog is de bewerking van de prikkel niet ten einde. De prikkelpatronen van het netvlies, die tweedimensionaal zijn, worden in een driedimensionale gewaarwording omgezet. Hierbij doet zich iets zeer merkwaardigs voor. We vullen met onze gezichtsindrukken slechts één ruimte, zoals we in het begin van dit artikel gezien hebben.

Stereoscopisch interpreteren werkt feilloos. Men vraagt zich daarom af hoe het mogelijk is dat in primitieve tekeningen, zoals kindertekeningen en middeleeuwse kunstwerken zo onbeholpen met het perspectief wordt omgesprongen. Is het zoveel moeilijker van de voorstelling naar de realiteit te komen dan van de realiteit naar de voorstelling? Inderdaad: we kennen feilloos de gezichten van onze huisgenoten, maar we kunnen ze, uitzonderingen daar-

gelaten, niet uit het hoofd tekenen. Dat doet zich ook voor bij andere vertrouwde vormen (zie fig. 2).

Maar er is meer. In de beeldende kunst speelt ook de tastruimte een rol. De tastruimte kent niet de vervormingen van de optische projectie. In de tastruimte blijft een rechte hoek altijd recht. Nu is het merkwaardig om te zien hoe alle zogenaamde vertekeningen op te vatten zijn als een compromis tussen tastruimte en optische ruimtevoorstelling. Het is alsof de tekenende hand er zich tegen verzet een hoek zo scherp of zo stomp af te beelden als het oog deze ziet.

De weg van het zien ligt uitgestrekt tussen twee mysteries. Het eerste mysterie is het licht. We weten niet wat elektromagnetische trillingen zijn. We weten ook niet hoe een kwantenregen en het kwantenkarakter van het licht te rijmen zijn met het golfkarakter van het licht. Ja, we weten eigenlijk niet eens, wat buiten ons voorstellingsvermogen de ruimte is. Daarbij komen nog de vervormingen die het beeld van de werkelijkheid in ons oog en in onze hersenen ondergaat. We kennen de werkelijkheid dus slechts in vertaling en dan nog wel in een vertaling die pasklaar gemaakt is aan ons beperkt bevattingsvermogen. De werkelijkheid zelf blijft een mysterie.

Maar ook het andere einde van de weg is mysterie. Waarnemen is een geestelijk proces. De sprong van het stoffelijke naar het geestelijke zal een eeuwig raadsel blijven.

Literatuur

Bij het schrijven van dit artikel is uitgegaan van: Colenbrander M.C., (1984). De weg van het zien. Leidsche Onderwijsinstellingen, Leiderdorp. ISBN 90-6783-001-1. Aan de omwerking van enkele hoofdstukken van dit boek tot drie artikelen is bijgedragen door Annemiek Demon, Bernadette Koopmans en Jac Niessen.

Overige literatuur

Held, R., Richards, W., (1975). Recent Progress in Perception. Readings from Scientific American, W.H. Freeman and Company, San Francisco. ISBN 0-7167-0533-8.

Rock, Irwin, (1986). Kijken en zien. Wetenschappelijke Bibliotheek van Natuur en Techniek.

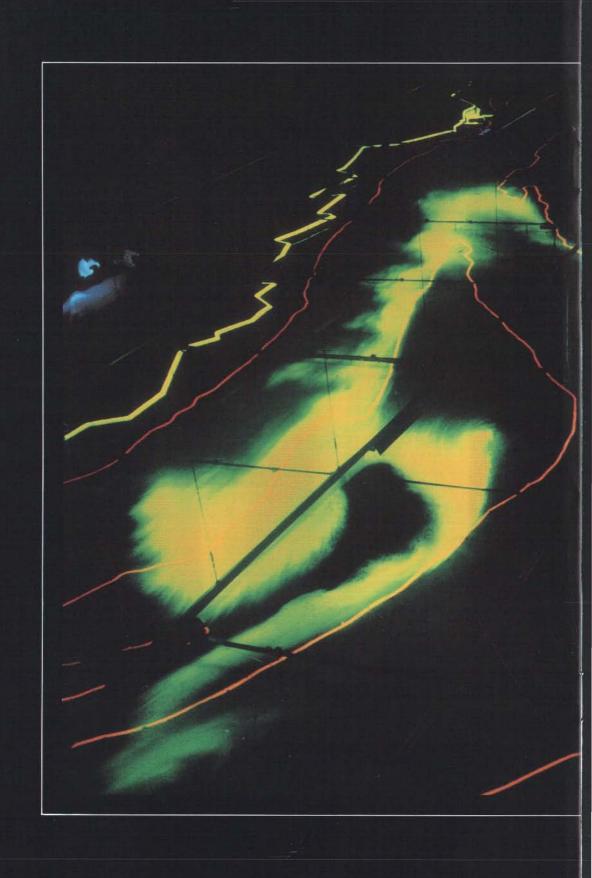
Bronvermelding illustraties

M.C. Escher Heirs, c/o Cordon Art, Baarn: pag. 766.

A. Reynhoudt, Hilversum: pag. 770.

Mauritshuis, 's-Gravenhage: pag. 772-773.

Alle overige illustraties komen uit: Rock, Irwin, (1986). Kijken en zien. Wetenschappelijke Bibliotheek van Natuur en Techniek.



I. de Vries Waterloopkundig Laboratorium J.P.G. van de Kamer Deltadienst Rijkswaterstaat Middelburg

ECO-LOGISCHE MODEL-BOUW

Rekenen aan een ecosysteem

De afsluiting van de Grevelingen in 1971 heeft tot een groot aantal veranderingen in de ecologie van dit gebied geleid. Deze kan men vaststellen door metingen te verrichten aan flora en fauna, de opgeloste voedingsstoffen e.d. Zulke meetreeksen geven een beeld van de veranderende werkelijkheid. Voor een (integrale) verklaring van het gebeuren en de mogelijkheid de effecten van een nieuwe ingreep te voorspellen, is het nodig een wiskundig model te maken.

Voorafgaande aan een ingreep, zoals het afdammen van een zeearm, tracht men de effecten daarvan te voorspellen. De bouw van modellen is daarbij een hulpmiddel. Dit kunnen wiskundige modellen zijn, maar ook schaalmodellen, waarin de geplande ingreep wordt uitgevoerd. Een dergelijk schaalmodel is gebouwd van de Oosterschelde. Daarnee is o.a. de menging van stoffen in het water door getijbewegingen bestudeerd. Daartoe is een fluorescerende stof ingebracht en bij UV-licht gefotografeerd. De kustlijnen zijn geel, de dieptelijnen van 10 m rood. We kijken vanuit 'Zierikzee' in westelijke richting en zien aan de 'horizon' het 'bouweiland Neeltje Jans'. De fluorescerende stof is bij nagebootste ebstroom linksonder aangebracht. De foto is gemaakt een half getij later, bij 'vloed' dus. Het blijkt dat de fluorescerende stof over een groot gebied en verschillende geulen verspreid is. De menging van stoffen in de Oosterschelde is dus heel intensief.

Een wiskundig model van een ecosysteem?

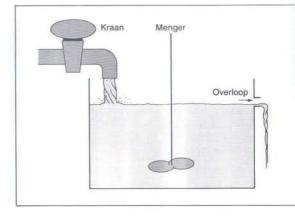
Van oudsher heeft de mens de ontwikkeling van zijn omgeving beïnvloed. Problemen waarvoor hij zich gesteld zag, leidden tot ingrepen in bosgebieden, rivieren, estuaria, enz. In de loop der tijd kregen deze ingrepen een steeds grootschaliger karakter. Mede ten gevolge daarvan sloegen de negatieve effecten in toenemende mate ook terug op de mens zelf. Bodemverontreiniging, zure regen, eutrofiëring en PCB's zijn voorbeelden daarvan.

Dit heeft ertoe geleid dat het zo langzamerhand gebruikelijk is geworden een nieuwe ingreep pas uit te voeren na een grondige analyse van de gevolgen voor mens en milieu. Daarbij worden de mens zelf, zijn natuurlijke omgeving, maar ook de reeds aanwezige technologische produkten beschouwd als elementen van één systeem. Maatschappelijke functies van het systeem (zoals de landbouw-, recreatie- en natuurfunctie) worden daarbij vertaald in doelstellingen en randvoorwaarden. Aan de hand daarvan worden verschillende mogelijkheden vergeleken op basis van wetenschappelijke kennis van het systeem. Een dergelijke reeks van activiteiten noemt men een systeemanalyse.

Van elke alternatieve ingreep die in overweging wordt genomen, moeten in de systeemanalyse de gevolgen worden geschat. Manipulaties met het werkelijke systeem (het prototype) zijn vaak moeilijk of zelfs onuitvoerbaar, vooral als het gaat om een ecosysteem. De gevolgen kunnen immers rampzalig zijn. Bovendien kennen vele ecologische processen een tijdschaal van vele jaren en kunnen allerlei onbeheersbare verschijnselen het effect van de manipulatie verdoezelen. Men neemt daarom vaak zijn toevlucht tot modelsystemen, zoals laboratoriumexperimenten, hydraulische en wiskundige modellen. Het wiskundig model komt de laatste tijd steeds meer in zwang. Het is een schematisering van het prototype in een set wiskundige vergelijkingen.

De ontwikkeling van een wiskundig model

Voordat de toepassing van een wiskundig model mogelijk is, moet het uiteraard eerst gebouwd worden. In de ecologie volgt men daarbij in feite dezelfde benadering als in de natuurkunde. De basis voor de modellering van fysische systemen is de oorzaak-gevolg-relatie tussen systeem-input en -respons (zie fig. 1). In het algemeen bestaat de input van een fysisch systeem uit toevoeging van materie of energie (fluxen) aan het systeem, terwijl de respons betrekking heeft op de waarneembare toestand van het systeem, veranderingen binnen het systeem en de invloed van het systeem op de omgeving. Een mathematisch model van dit fysische systeem is een set wiskundige vergelijkin-



gen die het prototype (de werkelijkheid) karakteriseert, in de zin dat slechts enkele input/ responsrelaties van het prototype correct worden weergegeven. De input en respons hebben de vorm van wiskundige functies of getallen, die corresponderen met experimentele waarnemingen.

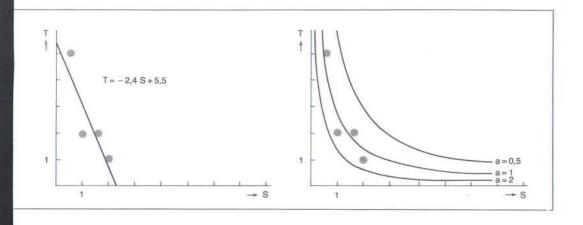
Lang niet alle denkbare relaties worden meegenomen. Dit betekent dat een model specifiek is; het heeft in beginsel alleen betrekking op het probleem waar het voor opgesteld is.

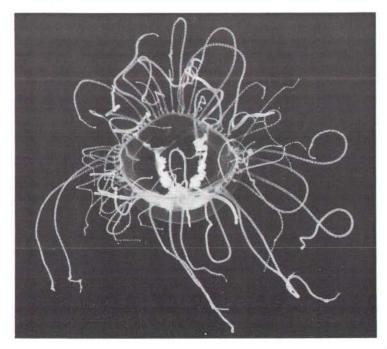
In het algemeen gaat de modelbouwer als volgt te werk. Met in zijn achterhoofd het probleem dat zijn model moet oplossen, put hij kennis uit twee bronnen. Om te beginnen maakt hij gebruik van kennis over fysische, chemische en biologische relaties om tot een structuur van zijn model te komen. Daarna verzamelt hij informatie van het systeem zelf in de vorm van meetgegevens. Deze kennis is nodig om de structuur te toetsen en nog ontbrekende coëfficiënten (de parameters) in het model te schatten.



Boven: Fig. 1. Het principe van de fysische systeemtheorie: gegeven een systeem (S) en een input (I), is de respons (R) bepaald. Bij modelontwikkeling is S echter onbekend, in tegenstelling tot de inputs en de responses.

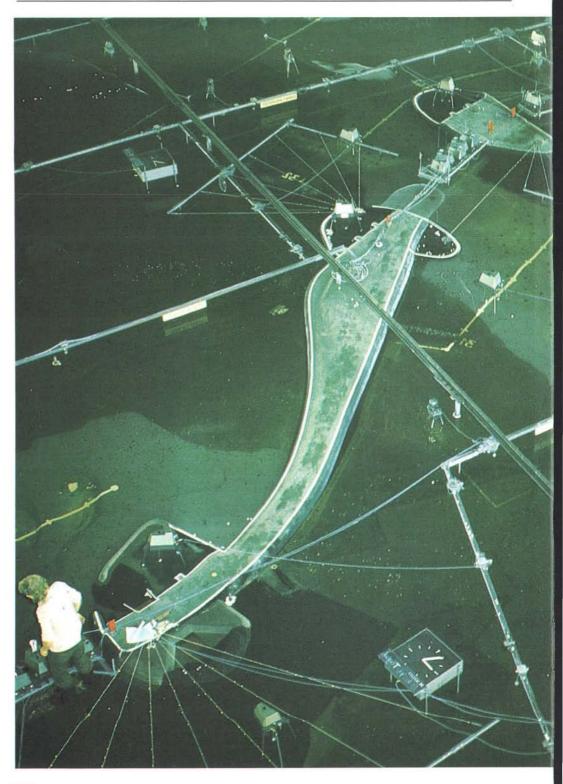
Eigenlijk is de werkwijze niet anders dan bij een lineaire regressie (zie fig. 2). Vermoedt men een lineair verband tussen twee variabelen dan kan men dit toetsen op basis van meetgegevens en tegelijkertijd de richtingscoëfficiënt en de asafsnede van de best passende lijn schatten. Hiervoor is een eenvoudige statistische techniek beschikbaar; tegenwoordig niet meer dan één druk op de knop van een beetje zakrekenmachine.





Boven: Fig. 2. Een ideale menger (a): het water in het vat (m3) wordt goed gemengd met water met een bepaalde concentratie opgeloste stof. Men meet het verband tussen de stand (S) van de kraan en de tijd (T) die nodig is om 90 procent van het concentratieverschil tussen in- en uitstroom weg te werken. Dit resulteert in een empirisch model als in b. Bij de ontwikkeling van een structuurmodel gaat men er vanuit dat een sprongsgewijze concentratieverhoging in de instroom leidt tot een geleidelijke verhoging in de uitstroom (Cu). Daarvoor geldt: $C_u = C_i$ (1 - e - Dt). Stel D = a.S, dan levert een combinatie van beide formules T= 2,3/a.S. Dit resulteert in de krommes (c). Deze hebben grotere realiteitswaarde dan de rechte in b.

Links: Het dwergkwalletje Gonionemuvertenis.



Soms heeft de modelbouwer veel theoretische kennis ter beschikking. Dit is bijvoorbeeld het geval bij het modelleren van elektrische circuits. Met de wetten van Kirchhoff en Ohm komt hij al een heel eind. Het blijkt dat modellen van dit soort systemen een grote voorspellende waarde hebben. Men spreekt dan van white-box modellen.

Soms echter moet hij bijna helemaal afgaan op meetgegevens. Met statistische technieken

probeert hij dan zgn. empirische (dat wil zeggen: op ervaring berustende) verbanden te leggen. Dit gebeurt vooral in de sociale en economische wetenschappen.

Voorspellingen met behulp van modellen voor deze systemen zijn heel vaak hachelijk en geven meestal aanleiding tot heftige discussies tussen vakbroeders over de vraag of bepaalde interpretaties al dan niet mogelijk zijn. Men spreekt van black-box modellen.

Links: Een gedeelte van het model van het Oosterscheldebekken, dat door het Waterloopkundig Laboratorium in de Noord-Oost Polder is gebouwd. Een groot aantal effecten van de bouw van de stormvloedkering in de monding van de Oosterschelde is in dit model bestudeerd.

Rechts: Bij het opstellen van wiskundige modellen wordt zo veel mogelijk gebruik gemaakt van bekende gegevens, die door veldonderzoek zijn verzameld. Die gegevens worden vergaard door het nemen van monsters van de bodem of het water. Op de bovenste foto brengt een duiker twee bodemmonsters naar de oppervlakte. Op de onderste foto is te zien hoe met behulp van een planktonnetje een monster zoöplankton genomen wordt.





Een grey-box model

Beschouw het ideale mengersysteem van figuur 2. Men is geïnteresseerd in de relatie tussen de stand van de kraan (S) en het tijdsverloop, waarin de concentratie in de uitstroom nagenoeg die van de instroom heeft bereikt (T), na een sprongsgewijze concentratieverandering in de instroom. Men kan daarvoor, zoals hierboven is gezegd, een empirisch model opstellen op basis van een aantal metingen. Men kan ook een structuurmodel opstellen, uitgaande van een theoretische benadering. Het blijkt dat de voorspellende kracht van het structuurmodel groter is dan die van het empirische model.

Men streeft in de ecologie dan ook meestal naar een structuurmodel. Toch valt in het algemeen niet te ontkomen aan een flinke dosis empirie, gedeeltelijk vanwege het ontbreken van ecologische kennis. Zo ontstaat een mengvorm, die wel een *grey-box* model wordt genoemd.

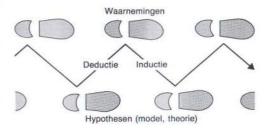
In feite is de tint van het model gekoppeld aan de kennis over en de aard van het systeem. De meeste modellen die in een bepaalde discipline gebruikt worden, zijn ongeveer even grijs. Ecologische modellen zou men 'donkergrijs': kunnen noemen.

Men zou kunnen stellen dat dit slechts het huidige inzicht in ecologische systemen karakteriseert. Donkergrijze modellen zouden na voldoende onderzoek 'gewit' kunnen worden. Dit wordt door sommigen betwijfeld. Zij zien de tint meer als een situatieschets, die aangeeft waar ecosysteemmodellen, waar het ecosysteem staat: er is weinig theoretische kennis, er zijn nauwelijks experimenten aan het systeem zelf mogelijk om deze kennis op te bouwen en er kleeft een relatief grote onzekerheid aan de meetgegevens.

Wanneer we vertrouwen op kennisvermeerdering door ecologisch onderzoek, kan hoe
langer hoe meer structuur in modellen worden
opgenomen, maar daar kan niet eindeloos mee
worden doorgegaan. De modellen zouden zo
gecompliceerd worden, dat zij niet meer bruikbaar zijn. Ze zouden zelf weer geschematiseerd
moeten worden. Bovendien gaan op een gegeven moment toevalsfactoren een rol spelen.
We blijven dus zitten met een grey-box model:
een mengsel van theoretische en empirische
kennis.

Onder: Fig. 3. De figuur geeft een symbolische weergave van het iteratieve leerproces. De moderne wetenschap schrijdt voort, dank zij afwisselende stappen met het inductiebeen en het deductiebeen. Inductie wil hier zeggen: algemeen conclusies trekken uit een beperkt aantal waarnemingen. Deductie is het omgekeerde, het op basis van algemeen regels veronderstellingen doen over bepaalde bijzondere situaties.

Rechts: Een schelpdier dat algemeen in het Grevelingenmeer voorkomt is de kokkel (*Cerastoderma edule*). De hier afgebeelde kokkels zijn voor commerciële doeleinden in bassins verwaterd.

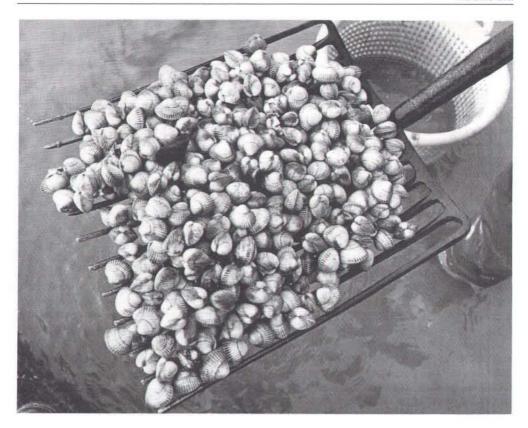


Fasen in de ontwikkeling

Op basis van het bovenstaande is een algemene fasering in het ecologische modelonderzoek aan te geven. Vier stappen worden doorlopen:

- structuurformulering: theoretische kennis levert hypothesen over het functioneren van het systeem. Deze worden vertaald in wiskundige formules;
- kalibratie: het toetsen van de structuurhypothesen aan veldwaarnemingen en het schatten van parameters;
- validatie: extra controle of het model toepasbaar is buiten het kalibratiegebied;
- toepassing: het voorspellen van de gevolgen van alternatieve ingrepen.

Bevindingen in de tweede en derde fase kunnen de modelleur ertoe bewegen de modelstructuur te herzien. De meeste fasen komen dus meer dan eens aan bod. Dit wijst op de mogelijkheid modellen, in plaats van als voor-



spellingsinstrument, te gebruiken om onderzoek vorm te geven (zie fig. 3).

Een belangrijke rol bij de sturing van dit iteratieve (zich steeds verbeterende) modelleringsproces speelt de statistiek. Onzekerheden in het model en de veldwaarnemingen werken door in de voorspelling die uit het model volgt. En aan de betrouwbaarheid daarvan worden natuurlijk eisen gesteld.

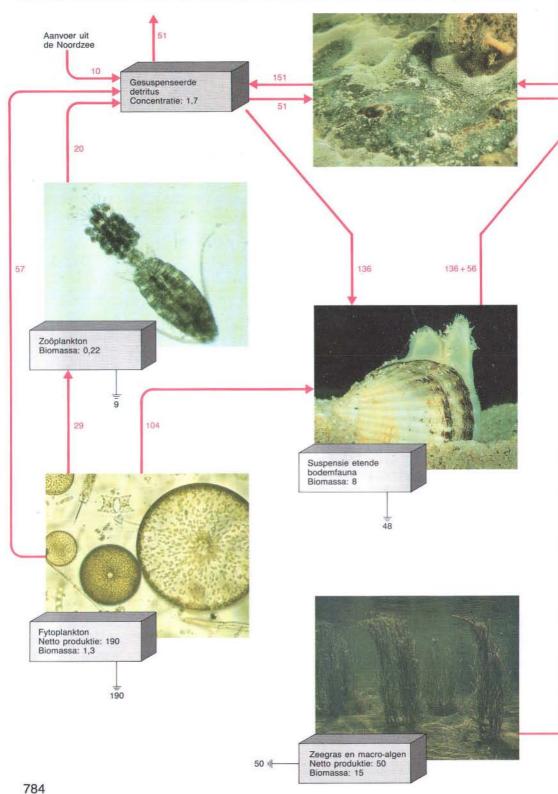
De Deltadienst van Rijkswaterstaat in Middelburg, het Waterloopkundig Laboratorium te Delft en het Delta Instituut in Yerseke hebben eerste stappen gezet op de weg naar modellering van zoute aquatische ecosystemen, zoals de Grevelingen. Daarop wordt in het vervolg ingegaan.

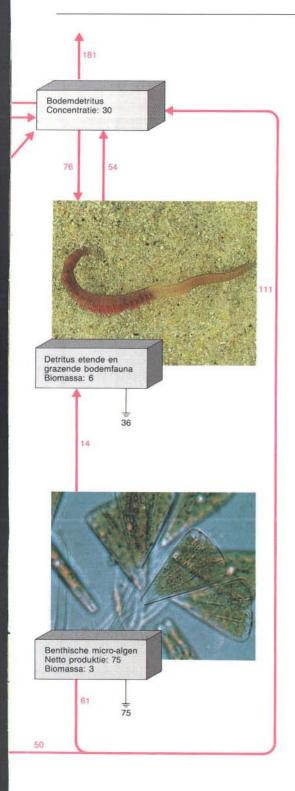
De koolstofbalans

Ecologisch modelonderzoek wordt vaak gericht op die aspecten, die een zo integraal mogelijk beeld geven van het systeem. Zo'n

aspect is de koolstofkringloop. Koolstof (C) is een element dat een belangrijk bestanddeel vormt van alle organismen. Globaal kan worden gesteld dat ongeveer 50 procent van het drooggewicht van organismen uit koolstof bestaat. Daarom is het gebruikelijk de biomassa van organismen en de materiestromen tussen organismen in hoeveelheden C uit te drukken.

Een zeer vereenvoudigd schema van de koolstofkringloop op jaarbasis is voor het Grevelingenmeer opgesteld (zie fig. 4). De organismen in het meer zijn bijeengevoegd in functionele groepen. Onder staan de primaire producenten, in het midden de consumenten en boven het dode organische materiaal (detritus), inclusief de bacteriën en schimmels die dit materiaal mineraliseren. Alleen kwantitatief belangrijke groepen organismen zijn in de balans opgenomen. Vissen en grotere schaaldieren als krabben en garnalen ontbreken; zij vertegenwoordigen veel minder dan 10 procent van de totale biomassa én produktie.





Veel getallen in de figuur zijn ontleend aan metingen. Voor de meeste stromen waren echter geen meetgegevens beschikbaar. Deze zijn dan ook berekend. Om een voorbeeld te geven: de consumptie van fytoplankton door de suspensie-etende bodemfauna, zoals mosselen, oesters en kokkels (104 gram C per m² per jaar) is berekend als het produkt van:

- de snelheid waarmee deze dieren water doorpompen en de daarin aanwezige deeltjes filtreren. Een flinke mossel van 0,5 g C bijvoorbeeld filtert per uur zo'n 31 water, oftewel ruim 25 m³ per jaar. Gegeven de gemiddelde diepte van de Grevelingen van 5,3 m komt dit overeen met 10 m²·gC-1·j-1;
- de hoeveelheid suspensie-etende bodemfauna: zo'n $8 \ gC \cdot m^{-2}$;
- de hoeveelheid fytoplankton in een kolom water van 5,3 m: ca. 1,3 $gC \cdot m^{-2}$.

Primaire produktie en plantenbiomassa

De koolstofbalans illustreert een aantal opmerkelijke eigenschappen van het Grevelingen-ecosysteem. Zo is meer dan driekwart van de plantaardige biomassa aanwezig in de vorm van grote waterplanten; denk aan de uitgestrekte zeegrasvelden. Toch verzorgen deze planten slechts ongeveer 15 procent van de totale primaire produktie. Het quotiënt van produktie en biomassa (de P/B-ratio, een maat voor de snelheid waarmee aanwezige biomassa wordt vernieuwd) is voor deze planten ruim 3 per jaar, een normale waarde.

Links: Fig. 4. Dit schema geeft een overzicht van de koolstofkringloop in het Grevelingenmeer. De organismen zijn gecombineerd in functionele groepen. De pijlen stellen processen voor als consumptie, sterfte, mineratlisatie, sedimentatie en resuspensie. De biomassa's en detritushoeveelheden zijn uitgedrukt in g C⋅m⁻²; de fluxen bij de pijlen in g C⋅m⁻²-jaar⁻¹. Respiratie is aangegeven met ±.

Onder: Een mannetje van de zwarte grondel bewaakt eitjes die in een oesterschelp gelegd zijn. Hoewel vissen in het Grevelingenmeer zeker van invloed zijn op de koolstofbalans, is hun invloed in vergelijking met die van andere groepen organismen ze gering, dat zij in een modelberekening buiten beschouwing kunnen worden gelaten.



Het grootste deel van de primaire produktie, ongeveer 60 procent, wordt geleverd door het fytoplankton, hoewel hun biomassa slechts 7 procent van het totaal van de producenten is. De P/B-ratio van fytoplankton is ongeveer 150 per jaar; gemiddeld wordt de totale biomassa elke 2 à 3 dagen vervangen; gedurende het groeiseizoen gebeurt dat zelfs binnen één dag.

De bodemfauna

Opvallend is ook de centrale positie van de bodemfauna. Schelpdieren als de mossel, de kokkel en de oester, evenals de recent opkomende zakpijpen, zijn de belangrijkste filtreerders of suspensie-eters. Dit blijkt uit het produkt van de hiervoor genoemde pompcapaciteit van de bodemfauna en de bodemfaunadichtheid. Jaarlijks wordt door de bodemfauna de bovenstaande waterkolom 80 maal doorgepompt. Anders gezegd, elke 4 tot 5 dagen passeert het gehele watervolume van het meer het filterapparaat van de bodemfauna. Dat is niet uitzonderlijk; in vergelijkbare ondiepe kustwateren in het buitenland en ook in de Waddenzee, zijn overeenkomstige waarden gemeten.

Deze enorme filterwerking leidt tot een grote 'graasdruk' op het fytoplankton; naar schatting 55 procent van de netto-produktie wordt door de bodemfauna geconsumeerd. Naast het fytoplankton worden ook niet-eetbare deeltjes, zoals zwevend slib en dood organisch materiaal gefilterd. Deze worden in slijm verpakt en (als pseudofaeces) op de bodem gedeponeerd. Volgens de koolstofbalansberekeningen is het transport van dood organisch materiaal naar de bodem langs deze weg 2 tot 3 keer zo groot als via passieve bezinking.

De nutriëntenbalansen

Naast koolstof vormen nutriënten als fosfor en stikstof onontbeerlijke bouwstenen van organismen. Wanneer per organisme de verhouding tussen koolstof en nutriënten bekend is, kan de koolstofbalans worden omgezet in een nutriëntenbalans. Voor op de bodem en in het water levende micro-algen in het Grevelingenmeer zijn op grond van literatuurgegevens de volgende, gemiddelde verhoudingen opgesteld: koolstof: fosfor: stikstof = 1:0,034:0,17

Een berekende balans voor stikstof is weergegeven in figuur 5. Deze figuur laat, als functie van de tijd, de verdeling van stikstof over de componenten van het ecosysteem zien. Zeegras, zoöplankton en bodemfauna zijn erbij buiten beschouwing gelaten.

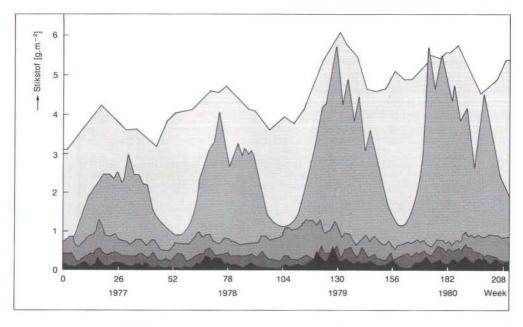
Wanneer het systeem volledig geïsoleerd zou zijn, met geheel gesloten nutriëntenkringlopen, zou de bovenste lijn in de figuur exact recht en horizontaal lopen. Afwijkingen van de horizontale lijn worden veroorzaakt door toevoer en afvoer van nutriënten. Zo bedraagt de jaarlijkse toevoer van stikstof via de uitslag van polderwater en regenval, zo'n 3,5 tot 4,5 g ·m⁻²·j⁻¹. Dit is bijna evenveel als er totaal aan stikstof in het hele systeem aanwezig is. Door deze belasting zou de hoeveelheid stikstof in principe jaarlijks kunnen verdubbelen. De werkelijke toename is echter een factor 10 kleiner.

Denitrificatie

Er moet dus sprake zijn van een verwijderingsproces dat de belasting vrijwel geheel compenseert. Naar alle waarschijnlijkheid is dit proces denitrificatie, de nagenoeg zuurstofloze bacteriële omzetting van nitraat in stikstofgas (N₂).

Voorwaarde voor een goed verloop van denitrificatie is een stringente koppeling met nitrificatie: de bacteriële vorming van nitraat uit ammonium, een proces waarvoor juist wel zuurstof beschikbaar moet zijn. De ideale plaats voor een combinatie van de twee processen is de toplaag (de bovenste millimeters) van het sediment. Daar komen zuurstofrijke en zuurstofloze plekjes vlak naast elkaar voor. Daar verzamelt zich ook het bodemdetritus, een bron van ammonium. Wordt deze toplaag zuurstofloos, dan ontwijkt het vrijkomende ammonium naar het bovenstaande water en wordt pas daar, of in het geheel niet, genitrificeerd. De koppeling met de denitrificatie is verbroken en de verwijdering van stikstof stagneert.

Deze opeenvolging van oorzaken en gevolgen is de meest waarschijnlijke verklaring voor de plotseling toegenomen nitraat- en vooral ammoniumconcentratie in het meer in 1979 en 1980. De opening van de sluis in de Brouwers-





Boven: Fig. 5. Deze tekening geeft een weergave van de stikstofbalans in het Grevelingenmeer in de jaren 1977 tot 1980. De bovenste lijn geeft het verloop weer van de totale hoeveelheid nutriënt die in de kringloop aanwezig is. Daaronder is de verdeling over verschillende componenten weergegeven. De hoeveelheid nutriënt in levende biomassa is steeds gering.

dam veroorzaakte toen gelaagdheid in het meer, doordat het zoute Noordzeewater zich in de diepere geulen verzamelde en niet mengde met het bovenstaande brakke water. Het gevolg was tijdelijke zuurstofloosheid van nagenoeg al het water beneden de 8 m waterdiepte, en ook van zo'n 20 procent van het bodemoppervlak.

Na 1979 is dit verschijnsel nauwelijks meer opgetreden, omdat de Brouwerssluis alleen in de winter open is. Blijkbaar is de denitrificatie weer op gang gekomen, aangezien de stikstof-concentratie zich weer bevindt op het lage niveau van de jaren 1973-1976.

Gelaagdheid op grote schaal moet worden vermeden, omdat dit funest blijkt te zijn voor de huidige voedselbeperkte situatie, waar het Grevelingenmeer een aantal van zijn unieke eigenschappen aan ontleent. Deze 'beheerregel' kan gezien het bovenstaande nog worden uitgebreid tot: elke oorzaak van ontkoppeling van nitrificatie en denitrificatie dient te worden vermeden.

Opslag van nutriënten

De stikstofbalans laat ook de seizoensdynamiek zien. De concentratie van opgeloste stikstofverbindingen in het water neemt in het voorjaar sterk af tot nauwelijks aantoonbare gehalten in de zomer en stijgt vervolgens weer in het najaar. Dit seizoensverloop kan goed worden beschreven als functie van produktie en mineralisatieprocessen. Primaire produktie is, behalve van de temperatuur, vooral afhankelijk van de beschikbare lichtenergie. De mineralisatiesnelheid is bij voldoende detritus uitsluitend temperatuurafhankelijk.

In het voorjaar wint de produktie het van de mineralisatie omdat de watertemperatuur achterloopt bij de toename van lichtinstraling. Opgeloste nutriënten worden opgenomen en vastgelegd in biomassa en, na afsterven, in detritus. In het najaar is de situatie omgedraaid, de watertemperatuur is nog hoog als daglengte en lichtintensiteit afnemen. Ook de hoeveelheid detritus is hoog.



Dan overheerst de mineralisatie en worden nutriënten geregenereerd uit detritus; hun concentratie stijgt weer. Gedurende de zomer houden produktie en mineralisatie elkaar in evenwicht, een zeer dynamisch evenwicht overigens. De turnover-snelheid van stikstof is ongeveer 10 per jaar. Dat wil zeggen dat elk stikstofmolekuul, dat 's winters opgelost in het water aanwezig is, gemiddeld 10 keer per jaar de hele cyclus van produktie, afsterven en mineralisatie doorloopt.

Het meest opvallend in de balansfiguur is de jaarlijks terugkerende 'opslag' van nutriënten in het bodemdetritus gedurende de zomer, oplopend tot meer dan 75 procent van het totaal. De fytoplanktonconcentratie wordt dan extra beperkt doordat in het bodemdetritus zoveel voedingsstoffen worden vastgehouden.

Boven: De bodem van de Grevelingen is deels bedekt met detritus, waarop ook schimmels groeien (de netvormige structuren). Het detritus is een belangrijke component van de nutriëntenbalans van de Grevelingen.

Rechts: Het in de Grevelingen overvloedige zeegras is niet de belangrijkste primaire producent. De bijdrage aan de primaire produktie bedraagt slechts 15 procent van het totaal. Het fytoplankton neemt het leeuwendeel voor zijn rekening.

Geheel rechts: Fig. 6. Het nonnetje (Macoma balthica) zorgt met zijn korte uitstroomsifon voor zuurstofverrijking van het sediment. Daardoor krijgen allerlei zuurstofafhankelijke soorten in het sediment een kans. De stippellijn laat zien hoeveel kleine wormpjes in de lagen rond een nonnetje gevonden werden. De getrokken lijn geeft aan hoe de verdeling van dezelfde wormpjes in normaal sediment is.

Hypothesen

Deze balansmodellen voor stikstof en koolstof zijn nagenoeg puur beschrijvend. Onder andere door de sterke afhankelijkheid van gemeten invoergegevens hebben ze nauwelijks voorspellende waarde. Door de integratie van bestaande kennis zijn ze wel een goed hulpmiddel bij het opstellen van hypothesen, veronderstellingen over welke factoren bepalend zijn voor het functioneren van het ecosysteem.

Voor de centrale positie van de filtrerende bodemfauna zijn twee hypothesen opgesteld: – filtratie en biodepositie zorgen voor verlaging van de concentratie fytoplankton, een stroom van organisch materiaal naar de bodem en opslag van nutriënten in bodemdetritus;

 de regeneratie van nutriënten uit organisch materiaal wordt versneld door directe uitscheiding en doordat faeces en pseudofaeces beter afbreekbaar zijn dan andere vormen van bodemdetritus.

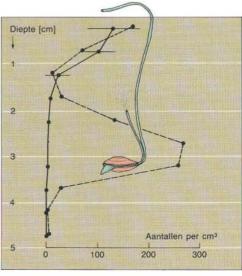
De twee hypothesen vormen een plausibele verklaring voor zowel de hoge produktie van het fytoplankton bij een continu zeer laag blijvende concentratie, als de 'opslag' van nutriënten in bodemdetritus. Voor buitenlandse kustwateren, waarin dezelfde verschijnselen zijn waargenomen, wordt aangenomen dat de bodemfauna zorgt voor een 'natuurlijke controle' van de algenbiomassa.

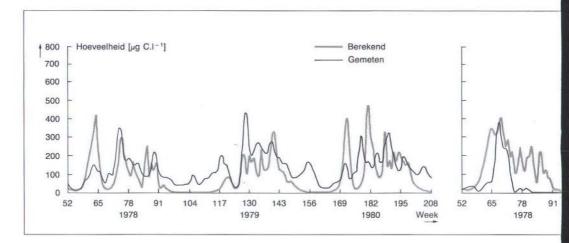
Specialisten en opportunisten

Toch zijn er vraagtekens te zetten bij zo'n aanname. Door consumptie van fytoplankton worden geen voedingsstoffen uit het systeem verwijderd, ze worden alleen tijdelijk ergens anders opgeborgen. Geleidelijke extra ophoping van bodemdetritus betekent dat extra zuurstof aan de bodem onttrokken moet worden, wat de kans op zuurstofloosheid vergroot. Dit zou op een wat langere termijn wel eens de verwijdering van stikstof via denitrificatie kunnen belemmeren en daardoor de algenbiomassa kunnen doen toenemen, in plaats van controleren.

Ook de verschillen in leefwijze van verschillende soorten bodemfauna zijn van belang. Bijvoorbeeld het nonnetje, een klein schelpdiertje dat zich diep ingraaft in het sediment, verrijkt de bodem met zuurstof en voedingsstoffen, doordat zijn uitstroomsifon niet boven het bodemoppervlak uitsteekt maar ergens in het sediment eindigt (zie fig. 6). Hierdoor wordt de groei van diatomeeën in de bodem bevorderd. Deze vormen de belangrijkste voedselbron van het nonnetje. Dit verschijnsel staat bekend als 'gardening'; het kweekt zijn voedsel op eigen mest en houdt ook de koppeling tussen nitrificatie en denitrificatie in stand. Een dergelijke leefwijze noemt men 'specialistisch'. Het nonnetje komt echter nauwelijks meer voor in het Grevelingenmeer.







Van andere zich ingravende schelpdieren, bijvoorbeeld de kokkel en de strandgaper, blijft de uitstroomopening boven het bodemoppervlak uitsteken. Deze soorten vertonen geen gardening. Ze kunnen als 'opportunisten' worden aangeduid. In het Grevelingenmeer is waargenomen dat hoge kokkeldichtheden het zuurstofgehalte in het sediment verlagen.

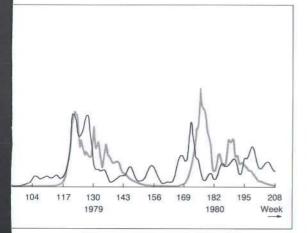
Simulatiemodel voor fytoplankton

Een veel gebruikt en zeer eenvoudig fytoplanktonmodel, voor het eerst opgesteld door Vollenweider, bestaat uit één vergelijking, waarmee uit de fosfaatbelasting en de verblijftijd van het fosfaat in een zoetwatermeer, de fytoplanktonconcentratie (uitgedrukt in chlorofyl) kan worden berekend. Voor een groot aantal Nederlandse zoetwatermeren zijn hiervoor metingen verricht. Fosfaatgehalten van rond 0,5 mg.l-1 leiden al gauw tot chlorofylgehalten van ca. 100 µg.1-1. In het Grevelingenmeer komt deze concentratie zelden boven 10 μg.l⁻¹: een treffende illustratie van het bijzondere karakter van dit ecosysteem. Op grond van de combinatie van factoren die normaliter de ontwikkeling van fytoplankton bepalen, verwacht men een minstens 10 maal hogere concentratie dan wordt gemeten. De hoeveelheid lichtenergie in het water en de hoeveelheid stikstof en fosfaat zijn voldoende om het meer te veranderen van kristalhelder naar vuilgroen en troebel, zoals we dat kennen van bijv. het Haringvliet.

De hypothesen over de invloed van de bodemfauna zijn verwerkt in het recent ontwikkelde fytoplankton-simulatiemodel voor het Grevelingenmeer. Een kalibratieberekening voor de jaren 1978-1980 is weergegeven in figuur 7. De overeenkomst tussen modelberekening en meetgegevens is bepaald niet vlekkeloos, maar het is de vraag of het veel beter kan. De onnauwkeurigheid van de meetgegevens is al zo'n 30 procent. Het gemiddelde biomassaniveau en de gemiddelde verdeling over de twee soortengroepen kloppen echter redelijk goed. Ook het karakteristieke verloop van een bloei van diatomeeën in het vroege voorjaar gevolgd door de opkomst van andere soorten is uit het model te halen. Opvallend is dat de voorjaarsbloei in 1979 te laag wordt voorspeld en in 1978 en 1980 te hoog. De berekende en gemeten totaal-produkties komen ook goed overeen met de werkelijkheid.

Voor een simulatie van de uitzonderlijk hoge P/B-ratio van het fytoplankton is extra aandacht besteed aan de processen die verlies van biomassa veroorzaken en op die manier de hoge produktie compenseren. De in het model geformuleerde verliesprocessen worden (als voorbeeld voor 1980) geïllustreerd in figuur 8. Ook volgens dit modelresultaat blijkt de invloed van de bodemfauna overheersend te zijn.

De twee hypothesen worden daarmee voorlopig bevestigd. Verwerking ervan in een model levert een goede simulatie van de werkelijkheid op.



Literatuur

Karplus, W.J., (1976). The future of mathematical models of water resources systems. In: Vansteenkiste, G.C.. System simulation in water resources. North Holland, Amsterdam.

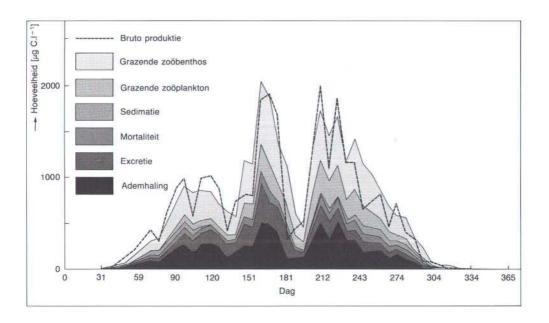
Vries, I. de, Hopstaken, C.F. en Veul, M., (1984). The in-fluence of nutrient availability on the ecosystem behaviour of Lake Grevelingen. Waterloopkundig Laboratorium, Delft, rapport R 1310-11.

Bronvermelding illustraties

Waterloopkundig Laboratorium, Delft: pag. 776-777, 781. René Kleingeld, Delta Instituut voor Hydrobiologisch Onderzoek, Yerseke: pag. 779, 783.

R.J. Leewis, Deltadienst Rijkswaterstaat, Middelburg: pag. 780, 784, 785, 789.

Duikgenootschap Nederland: pag. 788.



Linksboven: Fig. 7. Deze figuur geeft een beeld van de fytoplanktondynamiek in het Grevelingenmeer, waarbij onderscheid is gemaakt tussen diatomeeën en overig fytoplankton. De stippellijnen geven de gemeten waarden, de getrokken lijnen de berekende waarden. In het voorjaar wordt een bescheiden bloei van diatomeeën gevolgd door een opkomst van andere soorten. In de zomer komen beide groepen, in wisselende verhoudingen naast elkaar voor.

Boven: Fig. 8. Deze figuur laat zien wat het lot is van het fytoplankton in de Grevelingen. De netto geproduceerde biomassa (= brutoproduktie – excretie – respiratie) blijkt voor meer dan 50 procent verloren te gaan via consumptie door bodemfauna.

Zoals voor het fytoplankton zijn of worden ook voor de andere groepen uit figuur 4 simulatiemodellen ontwikkeld. Daarnaast krijgen de transportprocessen nog expliciet de aandacht. Samengevoegd ontstaat er een ecologisch simulatiemodel, dat na validatie in staat zal moeten zijn het gedrag van het Grevelingenmeer, ook bij eventueel gewijzigd beheer, te voorspellen. Bovendien zijn deelresultaten van belang bij modelvorming voor andere zoute wateren.





De bruikbaarheid van militaire raketten in de afgelopen jaren is het meest vergroot door de perfectionering van de geleidingssystemen. Hierdoor wordt een nauwkeurigheid bereikt die enkele jaren geleden ondenkbaar was.

Die nauwkeurigheid wordt met verschillende technieken bereikt, hoewel er steeds drie fundamentele elementen aanwezig zijn:

- een sensor die het doel opspoort;
- een computer die continu de baan berekent;
- een automatisch besturingssysteem dat de commando's van de computer uitvoert.

Aan elk van deze elementen is de afgelopen jaren veel onderzoek gedaan, waarbij vooral met de sensoren aanzienlijke vooruitgang is geboekt: ze zijn gevoeliger en preciezer geworden. Ook de computers zijn aanzienlijk verbeterd, zowel de programmatuur (software), als de apparatuur (hardware). Voordat wij dieper ingaan op de technieken die deze nieuwe ontwikkelingen mogelijk hebben gemaakt, staan we kort stil bij een globale indeling van de belangrijkste wapentypen.



Een belangrijk onderscheid moet gemaakt worden tussen strategische en tactische wapens. Tactische wapens worden ook wel 'slagveldwapens' genoemd. Ze zijn vooral bedoeld om betrekkelijk kleine doelen te vernietigen: tanks, vliegtuigen, schepen, enz. Strategische wapens daarentegen zijn juist op grootschaliger doelen gericht, zoals steden, industrieterreinen, militaire bases. Zij worden vooral gebruikt om de economische en militaire infrastructuur van de tegenstander te treffen.

Bij de strategische raketten zien we de laatste jaren vrij weinig echte vernieuwingen. Er komen wel nieuwe typen beschikbaar, zoals de Amerikaanse MX, maar de belangrijkste ontwikkelingen op strategisch gebied liggen buiten de rakettechnologie. De meest bekende daarvan is natuurlijk 'Star Wars', dat officieel Strategic Defence Initiative (SDI) heet. Doel van dit programma is om strategische kernwapens vanuit de ruimte op te sporen en al kort na hun lancering te vernietigen met behulp van lasers. Velen zien in dit programma een verstoring van het evenwicht dat ontstaan is doordat de grote mogendheden in staat zijn elkaar met strategische wapens te vernietigen, zonder dat daartegen een goede verdediging mogelijk is.



De dezer dagen in Nederland veel besproken kruisraketten kennen zowel strategische als tactische toepassingen. Daarop komen we verderop in dit artikel nog terug.

Veel nieuwe ontwikkelingen zien we wèl bij de tactische wapens. Dit heeft verschillende redenen. Sinds het einde van de Tweede Wereldoorlog is er een aantal 'beperkte oorlogen' gevoerd, zoals in Korea, Vietnam, het Midden-Oosten en de Falkland-eilanden. Hierdoor ontstond een zekere vraag naar tactische raketten. Bovendien hanteren de Amerikanen tegenwoordig de strategie van het 'flexibele antwoord': de reactie wordt aangepast aan de omvang van de aanval. Tenslotte zijn de Europeanen, allesbehalve gecharmeerd van de kans op een nucleaire verwoesting van hun continent, er voorstander van een eventuele aanval door het Oostblok met conventionele wapens te stuiten.

Hier krijgen ontwerpers en bouwers van tactische raketten de kans een bewijs van hun kunnen te leveren. Het is bekend dat de Sovjet-Unie over zeer grote aantallen tanks en jachtbommenwerpers beschikt. De Europese verdediging moet dan ook steunen op raketten die door kwantiteit en kwaliteit (nauwkeurigheid, explosie-effect, doorboringscapaciteit) in staat zijn de situatie van numerieke minderheid waarin de verdediger verkeert, om te keren. De verdedigers zullen zich echter niet beperken tot het tegenhouden van de troepen van de eerste linie. Zij zullen ook de tweede linie en de reserves van de tegenstander trachten aan te vallen. Om die taak aan te kunnen, zijn er grond-grond-raketten (vanaf de grond gelanceerd en bestemd voor gronddoelen) voor de middellange afstand en lucht-grond-raketten nodig. 'Strike deep', in de diepte treffen, is één van de hoekstenen van de verdediging van Europa.

Het nieuwe slagveld

Tactische raketten worden ook gebruikt vanuit vliegtuigen tegen andere vliegtuigen, vanuit vliegtuigen tegen schepen en vanaf schepen tegen andere schepen, enz. Lucht- en zeegevechten hebben daardoor een volledig ander gezicht gekregen.

Het jachtvliegtuig en de jachtbommenwerper zijn heden ten dage vliegende; schepen drijvende lanceerinrichtingen. De jachtvlieger vecht tegen een vijand die soms, althans aan het begin van het gevecht, nog buiten zijn gezichtsveld is. Hij vecht met behulp van elektronische middelen, die hem zeggen waar hij naar toe moet vliegen, die zijn raketten richten en ze met zijn toestemming lanceren. De raketten zoeken vanaf dat ogenblik zelf hun doel op. De mitrailleurs en kanonnen waarmee vliegtuigen zijn uitgerust, vormen secundaire wapens die doorgaans alleen worden gebruikt wanneer alle raketten zijn gelanceerd.

Het tot zinken brengen van de HMS Sheffield, die tijdens het Falkland-conflict getroffen werd door een Exocet-raket, afgevuurd door een vliegtuig, heeft de deskundigen die goed wisten waartoe de tegen schepen ingezette raketten in staat zijn, niet verbaasd. Aangezien deze raketten dank zij de besturing met behulp van een radiohoogtemeter, net boven het wateroppervlak vliegen, worden zij pas op

Linksboven: De Duitse V-1 is een voorloper van het huidige kruisvluchtwapen; een onbemand vliegtuig met een straalmotor en een explosieve lading. Doordat het geleidingssysteem verre van perfect was, konden veel V-1's gelukkig tijdig onderschept worden. Bij de kruisraket is dat vrijwel onmogelijk.

Rechts: Met behulp van deze draagbare 'Laser Locator Designator' is het mogelijk om van grote afstand de positie van doelen in het veld te bepalen, zodat wapens met grote precisie gericht kunnen worden.





het laatste moment waargenomen, waardoor zij een moeilijk af te weren gevaar vormen.

In het zeegevecht heeft het kanon volledig zijn betekenis verloren: de grote tweelings- en drielingstorens met hun machtig geschut, vroeger de trots van de slagschepen, zijn met de schepen zelf verdwenen. Thans heeft zelfs de torpedo aan belangrijkheid ingeboet, ten voordele van de raket. De Japanners hadden het al begrepen: hun kamikaze-vliegtuigen waren niets anders dan raketten met menselijke besturing. Door de elektronica kan de raket thans zonder zelfmoordvlieger naar het doel worden geleid en dat treffen.

Nauw verbonden met deze operationele aspecten zijn er economische aspecten die de ontwikkeling van deze raketten beïnvloeden. Voor de grote raketten zijn slechts weinig producenten en weinig klanten voorhanden. Voor de kleine raketten is dat precies andersom en dit geldt zowel voor de Europese landen, als voor de landen van de Derde Wereld. Niemand wil dat zijn buurman machtiger wordt. Als deze een raket aanschaft, dan is het normaal dat je er zelf twee koopt. Daarom liggen raketten zeer goed in de markt, op voorwaarde echter dat zij nauwkeurig en doeltreffend zijn.

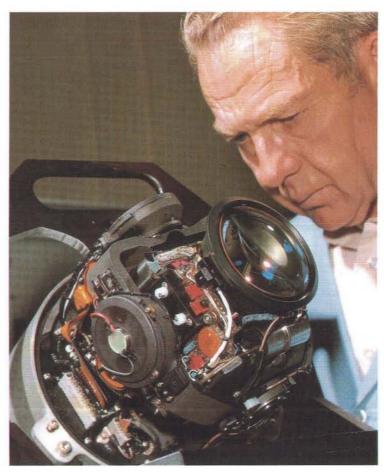
Om de kwaliteit van de raketten te kunnen verbeteren, moet dan ook aan twee voorwaarden worden voldaan: er moet geld en een veeleisende clientèle voorhanden zijn. Het resultaat is een ongelooflijke technische vooruitgang: nieuwe systemen, nieuwe materialen, stoutmoedige en fantasierijke ontwerpen doen wapens ontstaan, waarvan men de technologie kan bewonderen maar het vernietigingsvermogen moet veraschuwen.

Vuur en vergeet

Typisch voor de moderne raketten is dat zij niet meer afhankelijk zijn van de persoon die ze heeft afgevuurd. Bij de eerste anti-tankraketten volgde de soldaat die de raket had afgevuurd, het projectiel in zijn vizier. Hij corrigeerde voortdurend de baan, zodat de raket recht op het doel afvloog. In Vietnam werd de TOW-raket (Tube-Launched, Opticallytracked, Wire-guided) gebruikt. Dit projectiel wordt geleid met behulp van een elektrische draad die vanuit de raket wordt afgewikkeld en verbonden is met een computer in het lanceerpunt. Degene die de TOW lanceert, moet alleen het vizier op het doel gericht houden en



Links: Deze F-15 van de Amerikaanse luchtmacht is uitgerust met een lichtgewicht radarsysteem dat verregaand geautomatiseerd is. Het neemt de vlieger tijdens het gevecht veel werk uit handen. Onder: Dit apparaat is het elektronische oog van de Angle Rate Bombing Set (ARBS). Het systeem is ingebouwd in jachtbommenwerpers en kijkt in feite met twee typen ogen. De grote lens hoort bij een TV-camera, waarmee het doelgebied bekeken kan worden. Het apparaat is verder voorzien van een laserseeker. De vlieger krijgt alle informatie over plaats en afstand van het doel op een scherm voor zich.



de raket, die via de draad informatie ontvangt, koerst er dan automatisch op af.

Om op het doel te kunnen blijven richten, moet men echter steeds binnen bereik van de vijand zijn. Bovendien kan men zich maar met één doel tegelijk bezighouden. De raketten van de nieuwe generatie zijn daarom van het type fire-and-forget. Een vergelijking tussen twee typen raketten, de Sparrow en de AMRAAM maakt het principe duidelijk. De Sparrow is een lucht-lucht-raket, die al meer dan twintig

jaar door de Amerikaanse luchtmacht wordt gebruikt en die vanaf 1986 wordt vervangen door de AIM-120, de Advanced Medium-Range Air-to-Air Missile (AMRAAM).

De gebreken van de Sparrow kwamen aan het licht tijdens luchtgevechten in Vietnam: het minimumbereik was te groot voor gevechten op korte afstand; de tijd tussen het moment waarop de radar het doel had opgespoord en het moment waarop de raket werd afgevuurd, was eveneens te groot. Bovendien



was de raket niet in staat een snel en manoeuvreerbaar vliegtuig te volgen. Deze tekortkomingen werden in latere versies verbeterd, maar er bleef een fundamenteel probleem over: de geleiding in de eindfase met semiactieve radar.

Het vliegtuig dat de Sparrow afvuurt, 'vangt' het doel met zijn radar. De radar van de raket, die zelf geen signalen uitzendt maar ze wel opvangt, vangt de echo van het doel op en richt zich daarop. De vlieger moet dus zijn radar op het doel gericht houden totdat de raket dit doel bereikt. Dit betekent dat hij slechts een doel tegelijk kan aanvallen en zelfs geen andere manoeuvres kan uitvoeren, ook al wordt hij op zijn beurt door andere vliegtuigen aangevallen.

Daarom bestond behoefte aan een nieuwe raket die de mogelijkheid zou hebben om het doel zelf op te zoeken, zodat de vlieger zich na de lancering niet meer met de raket hoeft bezig te houden. Het nieuwe wapen moest ook kunnen worden gebruikt onder alle mogelijke weersomstandigheden, op alle mogelijke hoogten, ook van boven naar beneden en bij zware elektronische afweermaatregelen.

De AMRAAM heeft drie soorten geleidingssystemen. Voordat de raket wordt afgevuurd, kiest de vlieger op zijn radar het doel. De radar registreert in volgorde van gevaarlijkheid tien doelen, waarvan er acht op het scherm verschijnen (de gevaarlijkheid wordt gemeten aan de hand van de afstand en de naderingssnelheid). Zodra de vlieger het doel kiest, wordt de positie daarvan automatisch in het inertiële geleidingsmechanisme van de raket ingevoerd.



Boven: Bij deze proefneming werd de effectiviteit van de AMRAAM-raket aangetoond. Op de bovenste foto is het projectiel juist gelanceerd door een F-16. Daaronder is te zien dat het radarsysteem in de raket deze linea-recta naar het doel voert, dat brandend neerstort.

Onder: Projectielen van het fire-and-forgettype vinden zelf hun weg naar het doel. Daartoe beschikken ze over een miniatuur radar die niet veel groter is dan een hand. De donkere haak zendt millimetergolven uit die door de paraboolantenne worden gebundeld en gericht.



De raket vertrekt en vliegt op het doel af. Als het doel, zoals tegenwoordig het geval is met vliegtuigen die uitgerust zijn met een radaralarmontvanger die de vlieger waarschuwt dat hij door de radar van een tegenstander is waargenomen, scherpe bochten begint te maken, steil klimt of duikvluchten uitvoert om zich aan de aanval te onttrekken, kan de aanvallende piloot de in het geheugen van het inertiële geleidingsmechanisme van de raket opgeslagen positie 'bijstellen' door een correctiecommando te geven. De radar in de jager gaat intussen door met het verkennen van de hemel (scanning), op zoek naar nieuwe doelen, waarbij het

vinnen vervangt of aanvult, wordt in diverse landen beproefd.

Ook de Wasp is een raket van het type fireand-forget. Toch is deze raket nog geavanceerder, omdat de vlieger die haar afvuurt, niet alleen het doel nooit met eigen ogen heeft gezien, maar het zelfs niet op zijn radar heeft waargenomen. Iemand heeft hem gezegd dat de vijand zich daar bevindt en hij vuurt zijn raketten in die richting af. De Wasp wordt vooral gebruikt tegen tanks. De boordcomputer is zeer nauwkeurig geprogrammeerd. Na de lancering laat hij de raket klimmen (of dalen) tot een bepaalde hoogte. In het terrein zoekt de





vijandelijk vliegtuig, waarnaar een raket is afgevuurd, niet uit het oog verloren wordt (*tracking*). Op die manier kan de piloot van een F-18 Hornet gelijktijdig acht projectielen op acht verschillende viegtuigen afvuren, terwijl zijn radar de hemel blijft afspeuren naar nieuwe doelen.

Maar laten we teruggaan naar de juist afgevuurde raket. Als het aangevallen viegtuig zich afschermt tegen de radar, kan de raket zo worden ingesteld dat zij naar de bron van de vijandelijke radiogolven die daarvoor gebruikt worden, vliegt. Dan zorgt het vijandelijk vliegtuig zelf met zijn storingen (jamming) voor de geleiding van de raket in de eindfase.

Bij raketten die door vliegtuigen tegen vliegtuigen worden gelanceerd, is de manoeuvreerbaarheid van groot belang om de ontwijkingsmanoeuvres van het doel te volgen. Dit wordt gerealiseerd met middelen die afwijken van de traditionele stuurvlakken (roeren, enz.). Men is er namelijk in geslaagd de koers van de raket te wijzigen door de stuwstraal af te buigen. Dit koersveranderingssysteem, dat beweegbare

radar naar gepantserde voertuigen. Zodra hij die vindt, kiest hij daaruit zijn doel en volgt daarbij de van tevoren geprogrammeerde instructies op: dan gaat hij in duikvlucht naar beneden, waarbij het bovenste gedeelte van de geschutskoepel, het meest kwetsbare punt, wordt getroffen.

Het is duidelijk dat de nauwkeurigheid van een raket bepaald wordt door de geleiding in de eindfase. Het belangrijkste onderdeel van de eindgeleiding is de zogenaamde seeker, de zoeker of ontvanger die bij de moderne raketten voor de koerscorrecties zorgt. Bij de antitankraketten van de nieuwe generatie wordt steeds meer gebruik gemaakt van lasergeleiding. Er worden echter ook alternatieven voor de laser bestudeerd; met name systemen gebaseerd op millimetergolven en infrarood-beeldvorming, die warme plaatsen zoals draaiende motoren van tanks en vliegtuigen opspoort, staan in de belangstelling. Infrarood- en laserstraling zijn niet gevoelig voor radarverstoring, maar kunnen wel met andere middelen kunnen worden gestoord.

Laser en infrarood

De Maverick, een lucht-grond-raket, is reeds twaalf jaar operationeel. Nadat er tot 1978 ongeveer 26000 Mavericks met TV-geleiding waren geproduceerd, begon men in 1981 dit wapen opnieuw te fabriceren, nadat aanzienlijke verbeteringen waren aangebracht. Daartoe behoren twee nieuwe typen sensoren (seekers), de ene met semi-actieve laser, de andere met infraroodbeeld.

In 1975 werd begonnen met de ontwikkeling van de *laser-seeker*. Dit apparaat wordt op de neus van de raket gemonteerd. Bij proeven op doelen die 'verlicht' werden met de laser die vanaf de grond door een waarnemer werd bediend, werden op 25 schoten, 22 directe treffers geregistreerd. Onderzoekers hebben zich vervolgens gestort op één van de grootste beperkingen van de laser, de slechte voortplanting bij regen. Het systeem moet immers bij alle weersomstandigheden gebruikt kunnen worden. Dit werd opgelost door de gevoeligheid van de ontvanger te verhogen. Alleen bij zware regen werkt het systeem nog niet.

De lasersensor werkt als volgt: de vlieger

haalt de beschermkap die de neus bedekt weg en stopt een code over de aard van het lasersignaal in het geheugen van de raket. De seeker begint dan automatisch te zoeken en wanneer hij de gereflecteerde laserenergie ontvangt en herkent, stopt hij automatisch de aftastende beweging en richt zich op het doel, daarbij eventuele bewegingen van het doel volgend (locks and tracks).

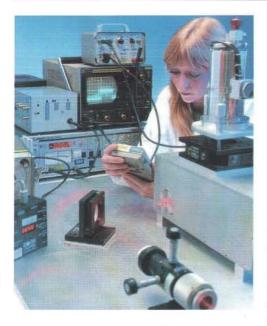
De vlieger ziet dat het kruis van zijn vizier in een vierkant verandert en weet dat de laserzoeker op het doel is gericht. Op het scherm verschijnt dan de informatie aan de hand waarvan de vlieger kan oordelen of de raket kan worden gelanceerd en hij zal eventueel nog enige manoeuvres uitvoeren om zijn toestel in een voor de lancering gunstigere positie te brengen. Na de lancering zal de raket, geleid door de nog steeds op het doel gerichte lasersensor, op het doel afvliegen.

Doelaanwijzing met gebruik van laserstralen is zowel overdag als 's nachts mogelijk, maar er zal niet altijd een waarnemer op de grond of in een vliegtuig of helikopter zijn, die zich langdurig aan vijandelijk vuur blootstelt, om de doelaanwijzing mogelijk te maken. De Ma-

Rechts: De kruisvluchtwapens die in diverse landen geplaatst zijn, worden gelanceerd vanuit speciale vrachtwagencombinaties die kant en klaar door een vrachtvliegtuig overgevlogen worden. Hier wordt een combinatie uitgeladen op de Engelse basis Greenham Common.

Geheel rechts: De kruisraketten kunnen in oorlogsomstandigheden naar elke willekeurige plaats gereden worden, om gelanceerd te worden.





Boven: Voorafgaande aan de bouw van een infrarooddetector wordt met behulp van een laserscanner bekeken of het detectormateriaal (een verbinding van kwik, cadmium en tellurium) voldoende homogeen op het detectorplaatje is aangebracht.

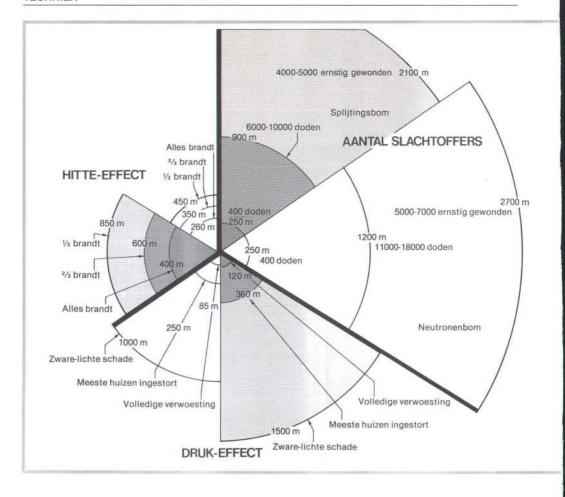
verick is echter ook beschikbaar in een andere versie, met infrarood-beeld (Imaging Infra Red, afgekort IIR of I²R).

Dit systeem werkt als volgt. Om zichtbaar te worden moet het doel een 'thermisch contrast' hebben met de omgeving. Doorgaans zijn de betrokken doelen warmer en geven derhalve infraroodstralen af die met behulp van een FLIR-systeem (Forward Looking Infra Red) worden opgevangen en aan de vlieger doorgegeven. Het FLIR-systeem is in het vliegtuig gemonteerd.

Het thermisch beeld verschijnt op een scherm in de cockpit en de vlieger beoordeelt zijn doelen en de wenselijkheid om die al dan niet aan te vallen. Besluit hij één van de doelen aan te vallen, dan stelt hij een infrarood 'oog' van de raket in werking. Op het scherm verschijnt nu het door het IIR-systeem gevormde beeld. De piloot stelt vervolgens zijn vizier in op het doel, drukt een toets in en vanaf dat ogenblik volgt de IIR-seeker (tracks) zelfstandig het doel en het geleidingssysteem wordt op dit doel vastgezet (locks).

De raket wordt dan gelanceerd en door het systeem naar het doel geleid.





Kruisraketten

De kruisraket is eigenlijk geen raket maar een onbemand vliegtuig dat op zijn doel afkoerst met behulp van een stuurautomaat die de in een programma vervatte instructies uitvoert. De kruisraketten worden namelijk voortgestuwd door straalmotoren (turbojet- of turbofan), net als vliegtuigen. In feite komt de kruisraket voort uit de V1, een Duits onbemand vliegtuig, uitgerust met een pulserende stuwstraalmotor, die voor de start werd geprogrammeerd om naar Londen te vliegen met een snelheid van 650 km.h⁻¹. Meer dan de helft van de gelanceerde V1's bereikten het doel niet, omdat zij door jachtvliegtuigen of door luchtafweergeschut werden neergehaald.

Het geheim van de kruisraket ligt in de voor-

uitgang die is geboekt met de toepassing van vliegtuigmotoren, micro-elektronica, kunstmatige satellieten en conventionele en nucleaire explosieven. Op motorengebied kunnen de ontwerpers over nieuwe betrouwbare turbofanmotoren met een laag verbruik beschikken. Door de micro-elektronica kan zeer lichte en compacte besturingsapparatuur worden gebouwd. Met behulp van satellieten en de nieuwe kartografische methoden kunnen, ook van niet-toegankelijke, gebieden topografische kaarten gemaakt worden. Tenslotte heeft de ontwikkeling van de conventionele springladingen het mogelijk gemaakt een aanzienlijk destructief vermogen met lichte, compacte materialen te realiseren.

Toen de twee supermogendheden overleg voerden over het SALT 2-verdrag over strate-

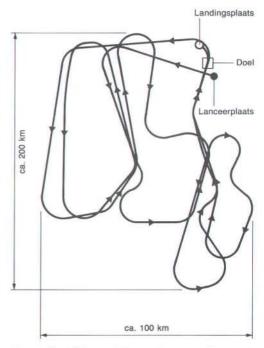
Explosie van een kernkop

Een aantal in dit artikel beschreven raketsystemen is geschikt voor het vervoer van kernwapens. Meestal zal het daarbij gaan om betrekkelijk kleine ladingen. Een voorbeeld daarvan is een kernwapen van 1 kiloton. Dat wil zeggen dat de explosieve kracht gelijk is aan die van 1000 ton TNT. Dat is minder dan bijv. de bom op Hiroshima, die was 20 keer zo zwaar.

Toch heeft ook zo'n kleintje een verwoestende uitwerking. Dat wordt duidelijk in nevenstaande figuur, die de effecten van zo'n kernexplosie boven een stad laat zien. Directe schade ontstaat door een enorme schokgolf en een hitte-effect. De uitwerking daarvan is in de figuur ingetekend.

Met het exploderen van het kernwapen is de kous nog niet af. Ongeveer 20 procent van de explosie-energie komt vrij in de vorm van straling. Driekwart daarvan is zgn. latere straling. Deze komt geleidelijk vrij uit splijtingsprodukten die bij de explosie zijn rondgestrooid (fallout) en uit stoffen die door de enorme zwerm vrijkomende neutronen, zelf aan het splijten zijn geslagen. Deze straling blijft lange tijd na de explosie een bedreiging voor alles wat leeft.

Hulpverlening aan de getroffen bevolking is uiterst moeilijk. De capaciteit voor de opvang van zo veel slachtoffers is nergens aanwezig. Openbare voorzieningen als gas, water, electriciteit en het rioleringsnet zullen op zijn minst ontwricht zijn.



Boven: Fig. 1. Eén van de kenmerken van de Tomahawk kruisraket is dat deze via elke willekeurige route naar zijn doel geleid kan worden, als deze route maar vooraf geprogrammeerd is. De figuur laat zien welke route de raket bij een proefneming aflegde. De totale afgelegde afstand bedroeg ca. 1400 km. Tijdens de vlucht scheerde het wapen tweemaal over een doel alvorens, opgebrand, aan een parachute neer te komen.

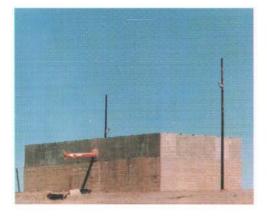
Linksonder: Bij de lanceerinstallatie wordt eerst de af te leggen route in de boordcomputer geprogrammeerd.



gische wapen, was er een hevige discussie, omdat de Amerikanen van oordeel waren dat de kruisraket een tactisch wapen is, terwijl de Russen beweerden dat het een strategisch wapen was. In werkelijkheid kan de kruisraket zowel strategisch als tactisch worden gebruikt. De raket kan door onderzeeërs en schepen worden gelanceerd; vanaf lanceerplaatsen op het land en vanaf voertuigen. Eén versie kan ook door vliegtuigen worden afgevuurd.

De geleiding van de kruisraket

De voornaamste kenmerken van deze raketten zijn de programmeerbaarheid en de mogelijheid bepaalde zones van het overgevlogen terrein te herkennen. Op grond van terreinherkenning wordt de koers tijdens de vlucht en





Boven: Deze drie foto's tonen het resultaat van een test met een Tomahawk in Californië. De raket werd gelanceerd vanaf een op 600 km afstand in de Stille Oceaan liggend schip en was voorzien van een conventionele springlading van 1000 pond. Het doel, een bunker met stevige muren van gewapend beton kreeg een voltreffer en werd totaal verwoest.

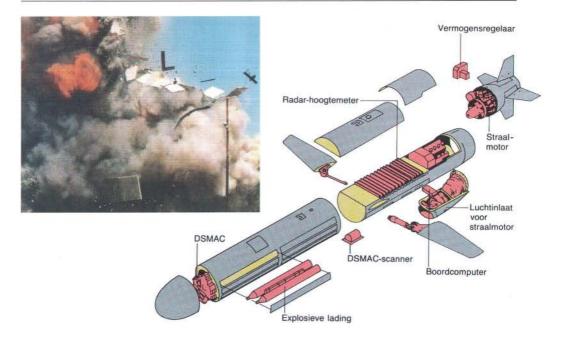
Geheel rechts: Fig. 2. Het aantal toepassingsmogelijkheden van de kruisraket is legio. Deze schematische tekening toont de belangrijkste onderdelen van een exemplaar dat door een vliegtuig kan worden afgeschoten. Dit type wordt vooral gebruikt om vijandelijke vliegvelden uit te schakelen. Daarvoor is het uitgerust met springladingen die voor kraters in landingsbanen zorgen.

vooral tijdens het laatste traject bepaald. De vraag die de ontwerpers zich hebben gesteld, is de volgende: "Wat zou een vlieger in plaats van deze apparatuur doen?". Het antwoord is: "Hij zou trachten bepaalde karakteristieke punten van het terrein dat hij aan de hand van luchtfoto's heeft bestudeerd, te herkennen; hij zal trachten zijn koers zo te wijzigen dat de hem bekende gevaarlijke gebieden, zoals batterijen luchtafweerraketten, worden vermeden. In de nabijheid van het doel gekomen, zou hij het doel op de juiste hoogte en uit de meest geschikte richting aanvallen".

TABEL. Overzicht van de gebruiksmogelijkheden van de Tomahawk-kruisraket.		
Lanceer- plaats	Doel	Lading
Zee	Gronddoelen	Nucleair
	Gronddoelen	Conventionee
	Schepen	Conventioneel
Land	Gronddoelen	Nucleair
Lucht	Vliegvelden	Conventioneel
	Schepen	Conventioneel

De koers van de kruisraket kan zo worden geprogrammeerd dat de raket precies deze dingen doet. Daarbij wordt gebruik gemaakt van twee aanvullende technische systemen: het TERCOM-systeem (TERrain COntour Matching) en het DSMAC-systeem (Digital Scene Matching Area Correlation). Met het eerste systeem kan de computer van de raket het terrein 'herkennen'. In het geheugen zijn de hoogtegegevens opgeslagen van het te volgen traject. Wanneer de kruisraket werkelijk over dit traject vliegt, meet zij met haar radarhoogtemeter de verschillende hoogten van het terrein en vergelijkt die gegevens met die welke in haar geheugen zijn opgeslagen. De verschillen worden verwerkt en de apparatuur stelt de koers bij. Het DSMAC-systeem maakt eveneens een vergelijking tussen dat wat de radar ziet en dat wat hij zou moeten zien. Het geheugen hiervan bevat vooral informatie over het gebied rond het doel. Voor de navigatie maken de kruisraketten o.a. gebruik van satellieten. Voor de eindgeleiding wordt de radar vervangen door of aangevuld met lasergeleiding of geleiding met infraroodstralen.

Volgens de ontwerpers heeft deze raket een grote kans dat zij haar opdracht tot een goed einde brengt, d.w.z. dat zij grote overlevingsmogelijkheden heeft, ondanks haar vrij lage



snelheid. Zij heeft namelijk een aantal daarvoor gunstige eigenschappen:

- een minimale radarecho en een te verwaarlozen infraroodsignaal;
- een lage vlieghoogte dank zij de nauwkeurige radarhoogtemeter, waardoor de raket aan elektronische en optische waarnemingsapparatuur kan ontsnappen;
- een niet-rechtlijnige, voor de vijand onvoorspelbare koers.

De koersgegevens, de elektronische 'beschrijvingen' van de referentiegebieden (voor het TERCOM-systeem) en van het doel (voor het DSMAC-systeem) zijn opgeslagen in cassettes, vergelijkbaar met videocassettes, die vlak voor de lancering worden ingebracht.

Technologie

Voor landen met een goed ontwikkelde technologie, vormt de geleide raket een van de voornaamste wapens bij alle soorten operaties en voor ook een belangrijk gebied van wetenschappelijk onderzoek.

Het is weinig bekend dat een van de belangrijkste uitvindingen op het gebied van de elektronica, de transistor, een succes werd omdat de Amerikaanse luchtmacht iets nodig had dat de besturingsapparatuur op de neus van de grote raketten klein, zuinig en bestand tegen acceleraties maakte. Daarom werd geld gestoken in de uitvinding van Bardeen, Brattain en Shockley. Niemand zou zoveel geld op tafel gelegd hebben om radio's draagbaar te maken. Uit de transistor ontwikkelde zich de techniek van de halfgeleiders en later de techniek van de Large Scale Integration en de Very Large Scale Integration (LSI en VLSI). Ook de microprocessors hebben de voor hun ontwikkeling noodzakelijke financiële middelen bij de militaire uitgaven voor raketten gevonden en zo zal het in de toekomst blijven gaan.

Literatuur

SIPRI, (1984). Het SIPRI-jaarboek over bewapening en ontwapening. Het Spectrum, Utrecht.

Ruiter, W. de, (1984). Laserwapens – Een kostbare illusie. Natuur en Techniek, 52, 10, Cat. nr. 84103.

Barnaby, F., (1982). Militair onderzoeks- en ontwikkelingswerk - Een bedreiging voor de wereldvrede? Natuur en Techniek, 50, 9, pag. 656-675.

Bronvermelding illustraties

Department of Defense, Washington DC: pag. 792-793 (voorgrond), 800, 801 (onder), 803, 804, 805.

Rijksinstituut voor Oorlogsdocumentatie, Amsterdam: pag. 794.

Alle overige foto's zijn afkomstig van Hughes Aircraft Company, El Segundo, Cal.

ACTUEEL

Nieuws uit wetenschap, technologie en samenleving

natuur en techniek

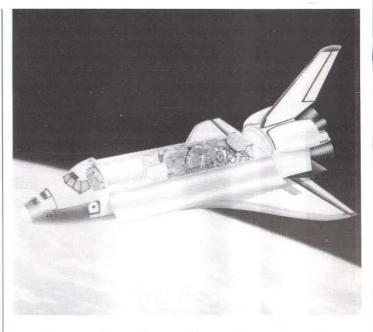
Nederland in Spacelab D-1

Op 30 oktober aanstaande zal het Europese ruimtelaboratorium Spacelab voor de vierde keer in de ruimte worden gebracht door de Amerikaanse Space-Shuttle. Deze Spacelab-vlucht is een echte Europese aangelegenheid. Aanvankelijk zou deze vlucht volledig door West-Duitsland worden gefinancierd. Ze werd dan ook de D-1 missie genoemd. Een volgende missie zou dan door de Europese Ruimtevaart Organisatie (ESA) worden betaald. In het begin van de jaren tachtig zijn beide vluchten echter gecombineerd: ESA beschikt nu over ca. 30 procent van de nuttige lading.

Nederland doet voor 4 procent mee aan het micro-zwaartekrachtprogramma van de ESA. Van de ca. 80 experimenten, die in Spacelab zullen worden uitgevoerd, zijn er maar liefst 9 van Nederlandse afkomst. Het gaat hier zowel om medische en biologische experimenten, als om fysische en materiaalkunde experimenten.

Die experimenten zullen voor een deel worden uitgevoerd door de fysicus Dr. Wubbo Ockels. Ockels, die in dienst is van de ESA, maakt als payload-specialist deel uit van de achtkoppige bemanning. Naast Ockels zijn er nog twee Duitse payload-specialisten. De rest van de bemanning bestaat uit Amerikanen: drie missiespecialisten, een piloot en een gezagvoerder.

Spacelab zal door de Space Shuttle in een baan om de aarde op een hoogte van 280 km worden gebracht en zal, als alles goed gaat, na een verblijf van tenminste 7 dagen in de ruimte naar de aarde terugkeren.



Een 'artist-impression' van de Spacelab. Achterin de romp de ruimte voor het onderzoek. (Foto: ESA).

In Spacelab kunnen experimenten worden uitgevoerd in een onder normale atmosferische druk staande werkcabine. Verder is het mogelijk om vanuit deze werkcabine, met op pallets geplaatste instrumenten, in de interstellaire ruimte te werken. De instrumenten op de pallets werken bij micro-zwaartekracht en bij absoluut vacuum. In Spacelab heerst geen absolute gewichtsloosheid, dit als gevolg van de aanwezigheid van de astronauten en door manoeuvres van de Shuttle e.d. Daardoor is het beter om te spreken van een micro-zwaartekrachtveld (10-4 g). In Spacelab spelen sedimentatie (neerslagvorming), opwaartse druk, convectie als gevolg van dichtheidsverschillen en hydrostatische druk een veel geringere rol dan onder aardse omstandigheden. Unieke mogelijkheden dus voor onderzoekers, die zich bezighouden met transportmechanismen in vloeistoffen en met kristalgroei. In de ruimte worden helaas niet alle stromingen geëlimineerd. Marangoni-stromingen, die op gang worden gebracht door verschillen in oppervlaktespanning aan een vrij vloeistofoppervlak, spelen in de ruimte een veel belangrijker rol dan op aarde en zijn in een aantal experimenten onderwerp van studie.

De unieke mogelijkheden van Spacelab heeft een groot aantal onderzoekers op het idee gebracht experimenten onder gewichtloosheid uit te voeren. Tijdens de D-1 vlucht zal men ondermeer metalen laten stollen, speciale kristallen produceren, vloeistofverschijnselen bestuderen, chemische en fysische experimenten doen evenals onderzoek op het gebied van de levenswetenschappen.

Voor al deze experimenten zijn opstellingen en apparaten nodig. In Spacelab is apparatuur aanwezig waarmee meerdere soorten onderzoek gedaan kunnen worden. Zo vindt materiaalonderzoek o.a. plaats met ovens uit het 'Materials Science Double Rack', waarin ook de vloeistoffysicamodule en de proceskamer voor chemisch onderzoek gemonteerd zijn.

De meeste onderzoekvoorstellen komen van grote researchinstituten en bedrijven. Het is echter voor iedereen mogelijk bij de Europese Ruimtevaartorganisatie onderzoekvoorstellen te doen. Zo zullen de astronauten enige proeven uitvoeren die door Nederlandse jongeren zijn bedacht. Het Nederlands Instituut voor Vliegtuigontwikkeling en Ruimtevaart in Delft (NIVR) kan hier meer inlichtingen over verstrekken.

Het is onmogelijk alle negen Nederlandse experimenten uitvoerig toe te lichten. In het hierop volgende zullen ze in het kort worden belicht. Met de vloeistoffysica-module gaat de Rijksuniversiteit van Groningen het massatransport bestuderen door een vloeistof-gas grensvlak. Dit is o.a. van belang voor destillatieprocessen in de petrochemische industrie, die de resultaten van dit onderzoek kan gebruiken voor het juist dimensioneren van hun apparatuur. Het tweede experiment in de vloeistoffysicamodule is afkomstig van het Nationaal Lucht- en Ruimtevaart Laboratorium en gaat over het dynamisch gedrag van vloeistoffen. Bij dit experiment wordt de vloeistofbeweging in diverse typen kleine vaatjes op film vastgelegd en wordt ook de invloed van de vloeistofbeweging op het vat gemeten. Dit onderzoek is van belang voor het ontwerpen van ruimtevaartsystemen die vaten

met vloeistof aan boord hebben. Het experiment van de T.H. Delft over de stolling van gietijzer, dat ook gedaan is tijdens de eerste Spacelabvlucht, zal herhaald worden. Niet verwachte verschijnselen tijdens de stolling in de ruimte zullen daarbij opnieuw bestudeerd worden.

Maar liefst zes Nederlandse biomedische experimenten zijn gepland: een onderzoek met kikkereieren en vijf onderzoeken die van belang zijn voor astronauten bij verblijf in de ruimte. Het biologische experiment van het Hubrecht Laboratorium te Utrecht heeft tot doel te onderzoeken hoe onder gewichtsloze omstandigheden uit het éénassige ei van een klauwpad een drie-assig embryo ontstaat. Dit onderzoek is met name van belang voor het voorkómen van Siamese tweelingen, waarbij de ontwikkeling van de normale as-vorming is verstoord. Het Instituut voor Zintuigfysiologie TNO te Soesterberg doet onderzoek in de zogenaamde kantelkamer waarin wordt bestudeerd hoe de astronauten voor en na de vlucht bepaalde opdrachten uitvoeren. In de ruimte registreert het evenwichtsorgaan de zwaartekracht niet meer. De hierdoor veranderde zintuigelijke informatie kan ruimteziekte veroorzaken. Na terugkeer op aarde moet het evenwichtsorgaan weer leren te leven met de zwaartekracht. De bestudering van dit gewenningsproces wordt nu in de door TNO ontwikkelde kantelkamer bestudeerd. Het onderzoek kan worden toegepast bij de studies over zee- lucht- en ruimteziekte en voor het helpen van patiënten met verstibulaire (evenwichts-) stoornissen.

De Rijksuniversiteit Limburg heeft een onderzoek voorgesteld over botdemineralisatie. Door bestudering van bloedmonsters van de astronauten probeert men meer te weten te komen over dit ontkalkingsproces. Het onderzoek geeft mogelijk ook een verklaring over het ontkalkingsproces bij oudere mensen. De positionering van de armen van de astronauten onder gewichtsloosheid is een onderzoekvoorstel van de Rijksuniversiteit van Groningen. Een van de astronauten zal met een leespen op een lineaal enkele gevraagde lengtes aangeven. Ook dit onderzoek kan van belang zijn voor een beter inzicht in het ontstaan van ruimteziekte.

Tenslotte zullen de astronauten twee experimenten, voorgesteld door het Max-Planck-Instituut voor Psycho-Linguistiek te Nijmegen, uitvoeren. Het eerste experiment gaat over de invloed van de zwaartekracht op de gebaren die bij het spreken worden gemaakt. De astronaut krijgt vanaf de aarde instructies, die op video worden opgenomen. De videobeelden worden later op aarde bestudeerd. In het tweede onderzoek krijgen de astronauten plaatjes te zien van objecten, waarin zij in verschillende standen moeten aangeven welke objecten links, rechts, onder of boven van elkaar staan. Het gaat er in dit onderzoek om na te gaan of in gewichtsloze toestand de bevindingen van de astronaut verschillen van die op aarde.

De D-1 vlucht is zoals gezegd, voornamelijk gewijd aan microzwaartekrachtonderzoek. In een van de volgende vluchten zal het atmosfeeronderzoek en aardobservatie veel meer aandacht krijgen. Op dit moment zijn tot 1989 een zestal Spacelab-vluchten gepland, waarvoor in Nederland grote belangstelling bestaat. Nieuwe voorstellen kunnen bij het NIVR worden ingediend.

Een belangrijk terrein zal het onderzoek aan materialen zijn. Nog betrekkelijk weinig materialen zijn in de ruimte vervaardigd. Toch verwachten de NASA en de ESA voor 1990 een bedrag van 42 miljard dollar te besteden op het gebied van de materiaalwetenschappen. 27 Miljard daarvan denkt men te besteden aan de produktie van medicijnen. Voor de produktie van het halfgeleidermateriaal galliumarsenide (chipsindustrie) denkt men ca. 3 miljard dollar te besteden. Fantastische getallen, die waarschijnlijk met een korreltje zout genomen moeten worden.

Een ding is echter duidelijk: de produktie van materialen in de ruimte zal steeds belangrijker worden.

Ir. D. de Hoop

Nederlands Instituut voor Vliegtuigontwikkeling en Ruimtevaart

Ir. T. Luijendijk

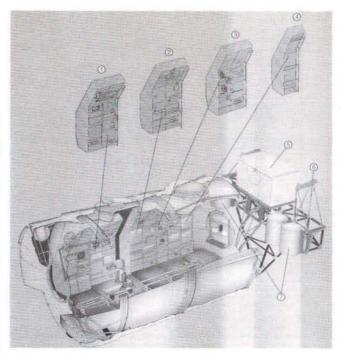
Tussenafdeling der Metaalkunde TH Delft

Graffiti

ledereen die voor de eerste keer gebruik maakt van de ondergrondse in New York zal zich stellig verbazen over de graffiti op de wagons. De autoriteiten van het openbare vervoer van de stad hebben als leuze: 'Maak New York schoon' en de graffitti zijn voor hen al vele jaren een zorgelijk probleem. Maar dat wordt nu opgelost. De stad heeft besloten om gebruik te maken van een 'geavanceerde technologie' uit Japan in de vorm van een graffiti-verwijderaar. Dit nieuwe wapen in de strijd tegen vandalisme is een waterkanon met een ultra-hogedrukstraalpijp. uiteinde daarvan waarmee wordt gewerkt heeft ongeveer de grootte van een pistool. Het water wordt uit enige tientallen diamant straalpijpies naar buiten gespoten onder een druk van 1500 atmosfeer, ongeveer 30 maal de druk van een brandspuit. Omdat het deel waarop de straalpijp is gemonteerd met een zeer hoge snelheid ronddraait, valt verf of vuil er direct af zonder dat het materiaal wordt beschadigd.

Omdat bij deze methode geen chemicaliën worden gebruikt wordt geen milieuvervuiling veroorzaakt en zijn de kosten gering.

(Nieuws uit Japan)



Onderzoeksapparatuur aan boord van Spacelab is in modules ondergebracht. Nr. 1 bevat o.a. video-apparatuur en temperatuurkamers, nr. 2 de apparatuur voor materiaal- en vloeistofonderzoek en nr. 3 o.a. het Morangoni-experiment. (Foto: ESA)

Schimmels tegen dioxine

Nog niet zo lang geleden stond Europa op zijn kop. De vaten met afgegraven grond uit het Italiaanse Seveso, met daarin het uiterst giftige dioxine, waren verdwenen. Uiteindelijk werden ze gevonden en in speciale ovens verbrand. Mogelijk is er nu een minder omslachtige oplossing voor dit soort gif gevonden. Biochemici van de Michigan State University hebben namelijk ontdekt dat de schimmel Phanerochate chrysosporium in staat is dioxine en ook DDT af te breken met behulp van het enzym ligninase. Normaal gebruikt de schimmel dit enzym om door houtige celwanden van planten te dringen. De werking berust op het feit dat ligninase aanleiding geeft tot de vorming van vrije radicalen, zeer reactieve chemische tussenprodukten. Deze slaan gaten in de grote ligninemolekulen waaruit hout is opgebouwd. In tegenstelling tot het lignine zelf, kunnen bacteriën de daarbij gevormde brokstukken wel verteren.
Ook dioxine kan niet door bacteriën afgebroken worden. Door er
echter met vrije radikalen de nodige brokken af te slaan kan natuurlijke afbraak wel gestart worden. In een test bleek de schimmel 18 dagen nodig te hebben om
90 procent van een aangeboden
DDT-oplossing af te breken.

Het systeem is nog niet zover ontwikkeld dat het in de praktijk bruikbaar is. Als het toegepast wordt, kan dat alleen bij waterige oplossingen, anders werkt de schimmel niet.

(New Scientist)

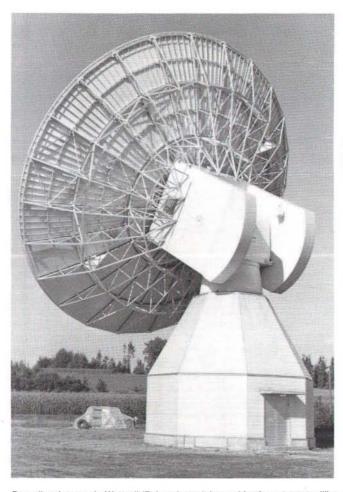
Aardmetingen

In de aardmeetkunde wordt meer en meer gebruik gemaakt van buitenaardse hulpmiddelen. Door vanuit twee plaatsen op aarde de afstand tot een peilster te bepalen, kan met eenvoudige meetkunde de afstand tussen die plaatsen gemeten worden.

Hoe nauwkeurig dat kan, bleek toen een nieuwe radiotelescoop in Beieren werd uitgeprobeerd. De afstand tot een station in Texas werd op exact 8417562 m gesteld, met een mogelijke fout van 4 cm. Ietsje dichterbij werkt het instrument nog nauwkeuriger. De afstand tot een radiotelescoop in Onoala (Zweden), bijna 920 km, werd vastgesteld met een fout van 7 mm.

Dergelijke nauwkeurige metingen zijn vooral van belang voor het meten van de onderlinge beweging van platen in de aardkorst.

(Persbericht Krupp)



De radio-telescoop in Wettzell (Beieren) wordt in combinatie met soortgelijke telescopen elders, gebruikt voor supernauwkeurige afstandsmetingen. (Foto: Krupp).

Genetisch goudmijntje

Het duurt nog wel een jaar of vijf à tien voordat er gewassen verbouwd worden die door genetic engineering, het sleutelen aan de erfelijkheid, zijn 'verbeterd'. Aldus dr. Karel Schubert, onderzoeksmanager van de Amerikaanse chemicaliëngigant Monsanto in een interview.

Genetische manipulatie komt neer op het biochemisch isoleren en transplanteren van erfelijke eigenschappen, waarbij stukjes chromosoom van één organisme worden ingebouwd in (de kern van) een ontvangende plante- of diercel. Die verbeterde cel wordt dan tot een heel organisme opgekweekt.

Op deze manier denkt men bijvoorbeeld in gewassen het vermogen tot stikstoffixatie in te bouwen, wat het gebruik van stikstofkunstmest sterk zou verminderen. Ook wil men gewassen bestendig maken tegen plagen en ziekten, en mogelijk zelfs tegen droogte of hitte.

Schubert, voorheen hoogleraar landbouwwetenschappen aan de Oregon State University, zei onlangs dat het nog jaren kan duren eer deze theoretische mogelijkheden resulteren in bruikbare planten voor de boer. Weliswaar hebben de 'genetische ingenieurs' al veel bereikt (bijvoorbeeld de produktie van menselijke insuline door veranderde bacteriën), voor hogere planten en dieren staat dit soort onderzoek nog in de kinderschoenen.

Het opwekken van weerstand tegen planteziekten, plagen en herbiciden (onkruidbestrijdingsmiddelen) lijkt voorlopig de meeste kans van slagen te hebben. Zulke resistentie is namelijk vaak gebaseerd op de aanwezigheid van een enkel gen in de celkern, dat resulteert in de produktie van bijvoorbeeld insektenafwerende stof of een herbicide-afbrekend enzym. Momenteel werkt dr. Schubert

aan het verbeteren van de eigen-

schappen van de sojaboon, een belangrijke leverancier van plantaardige olie.

Soja en maïs worden in de Verenigde Staten vaak in wisselcultuur verbouwd, met behulp van grote hoeveelheden herbicide. Deze beperken de kosten en hoeveelheid werk die anders in onkruidbestrijding gaan zitten. Het nadeel van veel herbiciden is echter dat ze niet alleen onkruiden doden; afhankelijk van hun werkingsspectrum tasten ze ook nuttige planten aan. Het inbouwen van de eigenschap om bepaalde herbiciden te weerstaan heeft voor een gewas dus duidelijk voordelen.

Volgens Biotechnology, het internationale vakblad voor industriële biologie, zijn diverse Amerikaanse bedrijven nu aan het werk om dergelijke resistentie in gewassen op te kweken. Men concentreert zich daarbij op een klein aantal chemicaliën waarvan men om diverse redenen verwacht dat ze enige tijd op de markt zullen blijven.

Een voorbeeld daarvan is het onkruidbestrijdingsmiddel glyfosaat (Roundup) dat bekend staat om een snel dodende werking via het blad en een spoedige biologische afbraak in de bodem. Veel tweezadige planten, onder andere de sojaboon, zijn er echter ook gevoelig voor. Met andere woorden, resistentie in dit gewas zou het gebruik van glyfosaat kunnen stimuleren.

Iets vergelijkbaars is aan de hand met het herbicide atrazine, een middel met een vrij lange verblijfduur in de bodem dat vaak in de maïscultuur wordt gebruikt. Er hoeft maar een keer mee gesproeid te worden, nadat de maïskiemplanten opgekomen zijn. De lange werking resulteert soms echter in schade aan sojaplanten nadat vruchtwisseling heeft plaatsgevonden. Ook hier is een ingesleutelde resistentie dus voordelig voor de boer - en voor de chemische industrie: men verwacht dat de verkoop van atrazine er alleen al in de Verenigde Staten met 120 miljoen dollar door zal toenemen.

Bij bepaalde koolplanten heeft men al natuurlijke resistentie tegen atrazine gevonden. Men zou dus alleen maar het erfelijk materiaal hieruit hoeven te transplanteren. Het gezochte gen blijkt echter deel uit te maken van het chloroplast-DNA. Omdat chloroplasten (bladgroenkorrels) nog niet toegankelijk voor genetische manipulatietechnieken is dit onderzoek (voorlopig) vastgelopen. Totnogtoe is alleen in de tabaksplant met succes een herbideresistentie ingesleuteld, namelijk tegen chlorsulfon (Glean). Dit herbicide is uiterst dodelijk voor alle planten behalve tarwe en gerst, wat de verkoop uiteraard beperkt.

Uit deze voorbeelden komt naar voren dat de chemische concerns die een flink onderzoeksbudget kunnen dragen, er duidelijk niet op uit zijn om hun eigen graf te graven. Onderzoek naar resistentie tegen ziekte en plagen, dat het gebruik van andere pesticiden overbodig zou kunnen maken, moet blijkbaar maar niet-commercieel gestuurd worden. Misschien ligt daar een rol voor genen sleutelaars in Nederland, dat volgens Biotechnology één van de drie leidende biotech-landen in Europa is.

Tevens constateert dat blad meewarig dat Nederlandse vooruitgang wordt geremd doordat, in tegenstelling tot in de Verenigde Staten en Japan, een goede samenwerking (lees: geldstroom) tussen zakenlui en academici ontbreekt. 'Onderzoeksvrijheid' wordt door *Biotechnology* in dit verband niet besproken.

> Drs. Jaap Jasperse Auckland, N.Z

NATUUR en TECHNIEK verschijnt maandelijks, uitgegeven door de Centrale Uitgeverij en Adviesbureau B.V. te Maastricht.

Redactie en Administratie zijn te bereiken op:

Voor Nederland:

Postbus 415, 6200 AK Maastricht. Telefoon: 043-254044*.

Voor België:

Tervurenlaan 32, 1040-Brussel.

Telefoon: 00-3143254044.

Bezoekadres:

Stokstraat 24, Maastricht. Advertentie-exploitatie: D. Weijer. Tel. 05987-23065.

De Centrale Uitgeverij is ook uitgever van de Cahiers van de Stichting Bio-Wetenschappen en Maatschappij.

Abonnees op Natuur en Techniek of studenten kunnen zich abonneren op deze cahiers (4 x per jaar) voor de gereduceerde prijs van f 30, – of 450 F.

Abonnementsprijs (12 nummers per jaar, incl. porto):

Voor Nederland, resp. België:

f 95, - of 1825 F.

Prijs voor studenten: f 72,50 of 1395 F.

Overige landen: + f 35, - extra porto (zeepost) of + f 45, - tot f 120, - (luchtpost).

Losse nummers: f 8,45 of 160 F (excl. verzendkosten).

Abonnementen op NATUUR en TECHNIEK kunnen ingaan per 1 januari ôf per 1 juli, (eventueel met terugwerkende kracht) doch worden dan afgesloten tot het einde van het lopende abonnementsjaar.

Zonder schriftelijke opzegging vóór het einde van elk kalenderjaar, wordt een abonnement automatisch verlengd voor de volgende jaargang. TUSSENTIJDS kunnen geen abonnementen worden geannuleerd.

Postrekeningen:

Voor Nederland: nr. 1062000 t.n.v. Natuur en Techniek te Maastricht. Voor België: nr. 000-0157074-31 t.n.v. Natuur en Techniek te Brussel.

Bankrelaties:

Voor Nederland: AMRO-Bank N.V. te Heerlen, nr. 44.82.00.015.

Voor België: Kredietbank Brussel, nr. 437.6140651-07.

TECHNIEK

GEÏLLUSTREERD POPULAIR-WETENSCHAPPELIJK MAANDBLAD

Hoe staat het met de Televisie?

De uitvinding van het ver-zien wordt wel eens vergeleken met een te vroeg geboren kind en terecht. Toen c.a. tien jaar geleden én in Amerika én in Engeland de eerste electrische overbrenging van levende beelden een feit was, werd het courantenlezende publiek al direct vergast op fantastische voorspellingen. Men heeft in deze technische eeuw nu eenmaal zoo veel vertrouwen in het kunnen der menschheid, dat men als vanzelfsprekend aannam, dat televisie, evenals de radio, binnen korten tijd haar plaats in onze huiskamers zou innemen.

Deze verwachtingen werden nog in de hand gewerkt door het feit dat Baird, die in Engeland met zijn systeem eenige min of meer geslaagde demonstraties had gegeven, de B.B.C. er ten laatste toe wist over te halen een gedeelte van haar zendtijd op de lange golf voor televisieuitzendingen ter beschikking te stellen.

Toen de B.B.C. een enquête instelde ten einde na te gaan of de belangstelling voor de televisieuitzendingen de dagelijksche beschikbaarstelling van zendtijd rechtvaardigde, werden deze uitzendingen teruggebracht op twee maal een half uur per week.

Bovendien heeft men in Mei van het vorige jaar een commissie in het leven geroepen ter bestudeering van het televisievraagstuk en deze commissie heeft juist een dezer dagen haar rapport ingediend. Zij is van meening dat het technische peil, hetwelk de televisie op het oogenblik heeft bereikt, de invoering hiervan, mits op de ultra-kortegolf, verantwoordt en men stelt zich thans binnen afzienbare tijd voor in Londen met de eerste uitzendingen een aanvang te maken.

Ofschoon de gedragingen van deze ultra-korte golven nog niet voldoende bekend zijn, mag toch wel als vaststaand worden aangenomen, dat zij zich, evenals het licht, hoofdzakelijk rechtlijnig voortplanten. Aangezien dus slechts ontvangst mogelijk is, zoolang ontvang- en zendantenne elkaar als het ware kunnen zien, is werkingssfeer van dergelijke zenders slechts beperkt.

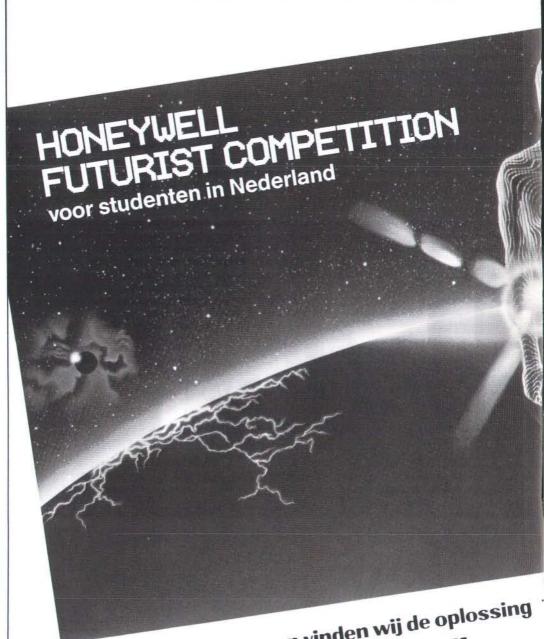
In dit verband valt nog te vermelden, dat Baird het vorig jaar eenige geslaagde demonstraties heeft gegeven met fijnrastertelevisie op de ultrakortegolf. Ten einde een zoo groot mogelijke werkingssfeer te verkrijgen was bij deze proefnemingen de zendantenne op een der hoogste punten van groot London geplaatst, n.l. op een der torens van het Crystal Palace, 94 m boven den beganen grond. Tengevolge van deze gunstige opstelling werd de zender in geheel London en zelfs daarbuiten behoorlijk ontvangen. Voor de aftasting van het uit te zenden beeld gebruikte Baird een Nipkowsche schijf, draaiende met een snelheid van 25 omwentelingen per secunde, hetwelk ongeveer gelijk is aan den thans bij de sprekende film geldende standaard. Deze beeldsnelheid waarborgt een rustig en flikkervrij beeld.

Bij de ontvangst werd gebruik gemaakt van een door Baird vervaardigde kathodestraalbuis, welke een zeer lichtsterk beeld geeft.

Ongetwijfeld zijn de bij deze demonstraties verkregen resultaten van invloed geweest bij het samenstellen van het bovengenoemde rapport. Naar vermeld wordt, zullen de televisieuitzendingen op de lange golf worden voortgezet, totdat een aanvang kan worden gemaakt met de ultra-kortegolf uitzendingen.

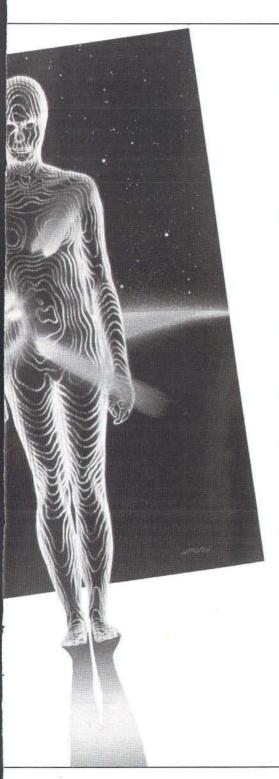
Dat verschillende Duitsche fabrieken zich serieus met televisie hebben beziggehouden blijkt wel uit het feit, dat een geheele hal aan hun producten is gewijd. In de z.g. "Fernsehstrasse" staan de verschillende ontvangtoestellen naast elkaar opgesteld, alle via een kabel met den televisie-zender van de Deutsche Reichspost verbonden. De overdracht vindt dus feitelijk niet draadloos plaats, hetwelk natuurlijk de storingsvrijheid van de beelden ten goede komt, doch overigens niet veel verschil beteekent.

De verkregen resultaten van alle ontvangers zijn zeer goed; de beelden varieeren in groot tusschen 20x25 cM en 40x50 cM. Bekijkt men de beelden op eenige meters afstand, dan is van het raster (180 beeldlijnen) zoo goed als niets meer te bespeuren en krijgt men den indruk van een filmbeeld, zij het iets minder scherp.



Samen vinden wij de oplossing

Honeywell



Wat kunt u winnen:

- Hoofdprijs \$500,-, en voorts prijzen van \$300-, \$200- en \$100-.
- De winnaar ontvangt een uitnodiging voor het Honeywell Futurist Competition Banquet in Londen.
- De winnaar maakt kans op een Honeywell beurs voor een jaar studie in de Verenigde Staten.

Hoe kunt u deelnemen:

Schrijf een essay van maximaal 2000 woorden, waarin u de belangrijkste technologische ontwikkelingen in de komende 25 jaar voorspelt op één van de volgende gebieden:

biomedische technologie, computers, elektronische communicatie, energie, lucht- en ruimtevaart, manmachine interface, oceanologie, de ontwikkeling van natuurlijke hulpbronnen, transport.

Wie kunnen deelnemen:

Alle studenten die aan een Nederlandse universiteit of hogeschool een volledige studie volgen.

Sluitingsdatum:

De sluitingsdatum voor inzending van uw essay is 1 januari 1986. De prijswinnaars worden eind januari 1986 bekend gemaakt.

Nadere informatie en deelnemersformulieren bij:

Honeywell b.v.

Public Relations Postbus 9183 1006 AD Amsterdam tel. 020 - 510 34 42

Cahiers Bio-wetenschappen en Maatschappij

Zojuist verschenen:

GESLACHTSHORMONEN

Regelaars onder controle?

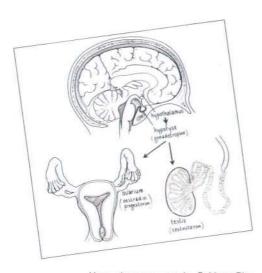
Voor veel mensen heeft het woord hormonen een negatieve betekenis. Ze denken dan aan dopinggebruik in de sport of aan geknoei met slachtvee. Hormonen zijn echter belangrijk voor het regelen van allerlei levensprocessen.

In dit Cahier worden de geslachtshormonen en hun toepassingen behandeld. Het eerste hoofdstuk schetst hun rol bij de voortplanting. Uit het tweede hoofdstuk blijkt dat een verband tussen geslachtshormonen en seksueel gedrag bij de mens nog onduidelijk is.

Al geruime tijd wordt gebruik gemaakt van nagemaakte hormonen of stoffen met een hormonale werking. Het bekendste voorbeeld is de *pil*. Het onderzoek aan en de vernieuwing van de pil wordt beschreven in hoofdstuk 3. Een nieuwe en mogelijk succesvolle ontwikkeling is de zgn. abortuspil.

Dat geslachtshormonen meer regelen dan alleen de voortplanting blijkt uit het hoofdstuk over de *overgang*. Bijzondere aandacht wordt daarbij geschonken aan osteoporose.

Toediening van geslachtshormonen als geneesmiddel staat onder controle. Dat is veel minder het geval met het veelal illegale gebruik bij slachtvee en in de sport. Daarover handelen de laatste twee hoofdstukken.



Inhoud en auteurs

Voorwoord

Hormonen zijn regelaars J.J. van der Werff ten Bosch

Geslachtshormonen en gedrag A.K. Slob & P. van der Schoot

Hormonen en de pil A.A. Haspels

De overgang

I. van Gent

Osteoporose D.H. Birkenhäger-Frenkel

Anabolica en slachtveehouderij R.W. Stephany, E.H.J.M. Jansen & F.X.R. van Leeuwen

Hormonen en sport J.M. van Rossum

Dopingbeleid in Nederland J.P. van der Reijden

Voor abonnees op de Cahiers Biowetenschappen en Maatschappij is dit het tweede nummer van de huidige 10e jaargang.

Abonnementsprijs (4 cahiers per jaar) f 32,50 of 620 F. Voor studenten en/of abonnees op Natuur en Techniek

f 30, – of 570 F. Losse nummers f 8,50 of 160 F (excl. verzendkosten). Verkrijgbaar bij: Natuur en Techniek – Informatiecentrum – Op de Thermen – Postbus 415 – 6200 AK Maastricht. Tel. 043-254044. Vanuit België: 00-3143254044.

ALS IEMAND U DIT KAARTJE LAAT ZIEN, KUNT U BETER WAT DUIDELIJKER ZIJN.



Als iemand u laat weten dat hij of zij doof is, zorg dan dat uw gezicht goed zichtbaar is, spreek langzaam en dui-de-lijk en herhaal zonodig dingen of schrijf ze op.

Zo bevordert u het contact. En dat is belangrijk. Want dove mensen horen er bij. **SRE**

Wat je van erfelijkheid moet weten voor je aan kinderen denkt.

Erfelijke factoren bepalen mede de geestelijke en lichamelijke gesteldheid van kinderen. Het is goed dat aanstaande ouders zich tegenwoordig over deze materie kunnen laten voorlichten. En het is ook goed dat particuliere ziektekostenverzekeraars en het Ziekenfonds de kosten daarvan betalen.

Er is nu een boekje verschenen over erfelijkheidsvoorlichting dat u

eens moet lezen. Dit boekje van de Vereniging Samenwerkende Ouderen Patiëntenorganisaties kunt u gratis aanvragen.

Een gefrankeerde brief naar: IDC, Postbus 70, 3500 AB Utrecht is voldoende.

ERFELIJKHEIDSVOORLICHTING. ZORĞ DAT Ú DE WEG WEET.